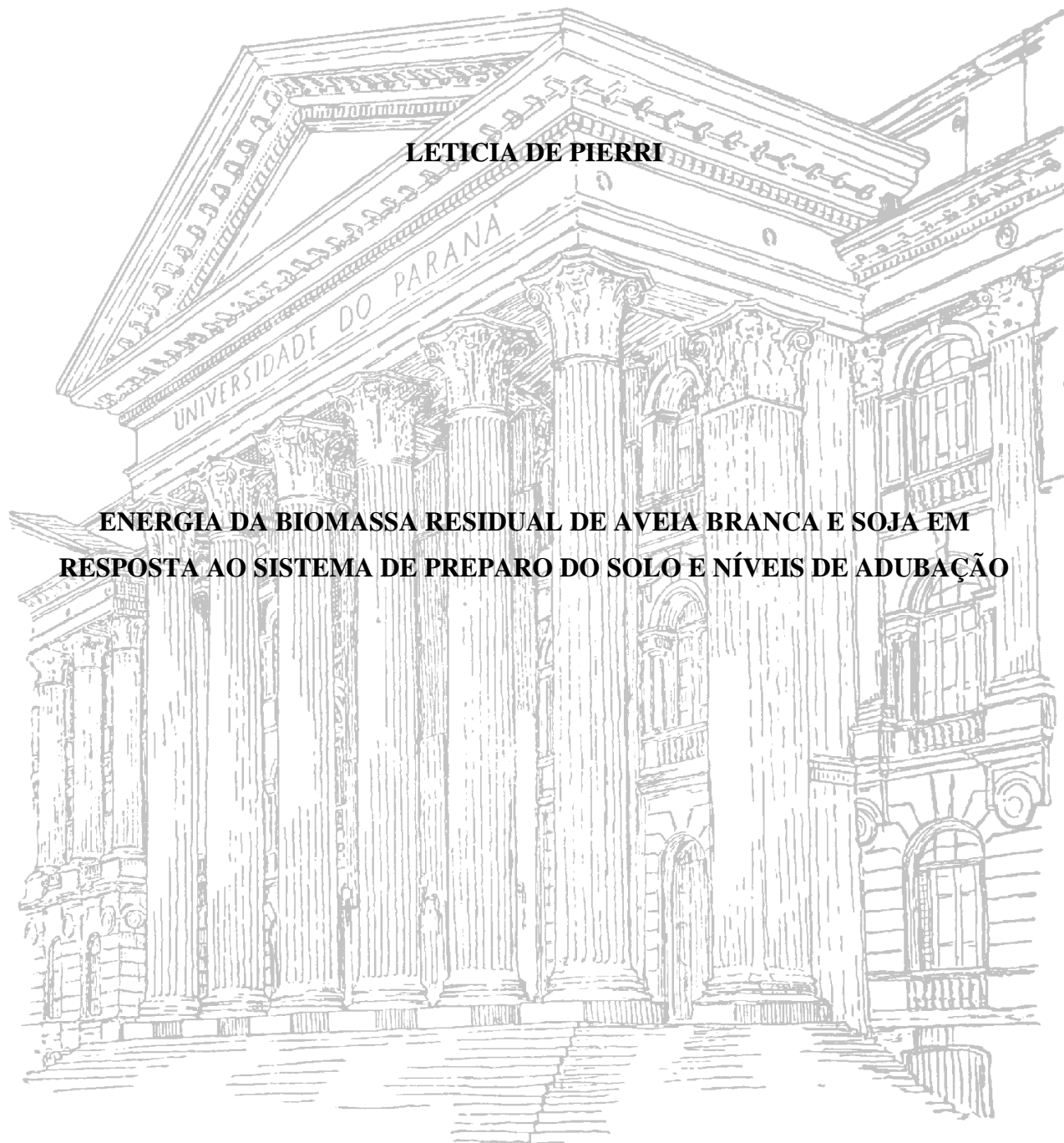


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LETICIA DE PIERRI

**ENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL DE AVEIA BRANCA E SOJA EM
RESPOSTA AO SISTEMA DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO**



CURITIBA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LETICIA DE PIERRI

**ENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL DE AVEIA BRANCA E SOJA EM
RESPOSTA AO SISTEMA DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas
Motta

Co-orientador: Dr. Gabriel Barth

CURITIBA

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **LETÍCIA DE PIERRI**, intitulada: **Energia da biomassa residual de aveia branca e soja em resposta ao sistema de preparo do solo e níveis de adubação**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição da candidata, emitem parecer pela **“APROVAÇÃO”** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 24 de janeiro de 2014.


Prof. Dr. Volnei Pauletti, Presidente


Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, 1ª. Examinadora


Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta, 2ª. Examinador

Entre a semente e o fruto, há o tempo.

“E ainda que tivesse o dom da profecia, *e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência*, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria”

(I Coríntios, 13:2)

À minha família, por me darem mais amor do que eu mereço,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder a chance de ser feliz todos os dias!

Aos meus amados pais, Osvercio e Aparecida, por me ensinarem mais do que integridade e honestidade: por me ensinarem o verdadeiro valor de uma família! E aos meus amados irmãos, Eric e Léia, por estarem ao meu lado sempre! Obrigada por tudo, amo vocês!

À minha amada avó, Alzira, pelas incessantes orações!

Ao meu orientador (e amigo), Prof. Dr. Volnei Pauletti, por ser um grande exemplo de profissional e de ser humano! Obrigada por me incentivar nesta longa caminhada!

Aos meus co-orientadores, Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta e Dr. Gabriel Barth, pelas valiosas contribuições a este trabalho!

À Universidade Federal do Paraná, minha segunda casa, por possibilitar alcançar meus sonhos!

À Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, pela parceria em todas as etapas do experimento!

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da UFPR, pela dedicação em fazer o melhor para o aperfeiçoamento de seus alunos!

Aos queridos amigos do PPGCS/UFPR, por compartilharem comigo momentos inesquecíveis nesses dois anos! Agradecimentos especiais aos “potassianos”: Giovana, Bruna, Murilo, Maico e Thiago Ranzan, além dos amigos Pergentino, Claudinei, Rodrigo Ambrosio, Reinaldo, Joyce, João Pascoalino, Tiago Jarek, Bruno, Gilson, Rose, Verediana, Marília, Raul, Julierme e Rangel. Levarei, sempre com carinho, todos vocês em meu coração!

Aos alunos que auxiliaram nas coletas de campo e análises de laboratório, em especial, aos graduandos de Agronomia: Diego, William, Michael, Bruno, Júlia, Carla, Luciano e Cesar.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR, em especial, à Maria, Denise, Gerson, Roberto, Cleusa, Aldair, Letícia e Elen.

Ao Laboratório de Energia da Biomassa Florestal, em especial, ao prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva, pela inestimável contribuição à realização das análises.

À Dra. Josileia A. Zanatta, Prof. Dr. Alex Maiorka, Cleusa e Hilbert, pelo auxílio nas análises.

Ao CNPq, pelo financiamento desta pesquisa, e a CAPES pela concessão da bolsa.

A todos, muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	ix
GENERAL ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1. CAPÍTULO I. ATRIBUTOS QUÍMICOS E ESTOQUE DE P E K DE UM SOLO SUBMETIDO A MÉTODOS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO POR 23 ANOS.....	5
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1.1. INTRODUÇÃO.....	7
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
1.2.1. ÁREA EXPERIMENTAL.....	8
1.2.2. ANÁLISES.....	9
1.2.2.1. Atributos químicos do solo.....	9
1.2.2.2. Densidade do solo.....	10
1.2.2.3. Cálculo dos estoques de P e K.....	10
1.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	10
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
1.3.1. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	11
1.3.2. ESTOQUES DE P E K.....	19
1.4. CONCLUSÕES.....	21
1.5. LITERATURA CITADA.....	22
2. CAPÍTULO II. ENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL DE AVEIA BRANCA E SOJA EM FUNÇÃO DO MANEJO DO SOLO.....	28
RESUMO.....	28
ABSTRACT.....	29
2.1. INTRODUÇÃO.....	30
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.2.1. ÁREA EXPERIMENTAL.....	31
2.2.2. ANÁLISES.....	33
2.2.2.1. Produtividade de grãos e de biomassa residual.....	33

2.2.2.2. Composição da biomassa residual.....	33
2.2.2.3. Poder calorífico e potencial teórico de produção de energia.....	34
2.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	34
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.3.1. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE BIOMASSA.....	35
2.3.2. COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA.....	37
2.3.3. POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	43
2.4. CONCLUSÕES.....	45
2.5. LITERATURA CITADA.....	45
CONCLUSÃO GERAL.....	52
APÊNDICE.....	53

ENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL DE AVEIA BRANCA E SOJA EM RESPOSTA AO SISTEMA DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO¹

Autor: Leticia de Pierri

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Co-orientador: Dr. Gabriel Barth

RESUMO GERAL

Em resposta à demanda crescente por fontes de energia sustentáveis, a biomassa residual da colheita de grãos apresenta um grande potencial como matéria prima para a produção de energia, visto que essa biomassa encontra-se prontamente disponível e em quantidade expressiva, principalmente em regiões de alta produtividade como a região dos Campos Gerais - PR. Dentre os diversos tipos de manejo do solo adotados em uma propriedade, destaca-se a ampla aceitação do plantio direto como método de preparo do solo, aliado à adubação mineral realizada anualmente, conforme recomendação para cada espécie usada na rotação de culturas. Os sistemas conservacionistas de solo bem como a aplicação de fertilizantes provocam mudanças nos atributos químicos do solo, o que implica em condições distintas de crescimento para as plantas, principalmente no que concerne à sua nutrição mineral. Em resposta a estes diferentes ambientes de crescimento, as culturas agrícolas apresentam variações em relação à produtividade de grãos e de biomassa, além de diferenças na composição elementar da biomassa residual, fato este que pode afetar o potencial desta matéria prima como insumo energético. O objetivo geral do trabalho foi avaliar o potencial energético da biomassa residual de aveia branca (*Avena sativa* L.) e soja [*Glycine max* (L.) Merr] em resposta às diferenças de fertilidade do solo proporcionadas por métodos de preparo e níveis de adubação. Para tanto, este trabalho está composto por dois capítulos, que buscam descrever (i) as alterações na fertilidade e no estoque de fósforo (P) e potássio (K) de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e níveis de adubação por 23 anos; e (ii) as alterações no potencial teórico de produção de energia a partir da biomassa residual da

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (53 p.) Janeiro, 2014.

colheita de aveia branca e soja proporcionadas pela adoção por longo prazo de diferentes métodos de preparo do solo e níveis de adubação. Um experimento de longa duração foi implantado no ano de 1989 no município de Ponta Grossa (PR), contando com uma combinação entre quatro métodos de preparo do solo (preparo convencional, com uma aração e duas gradagens leves – PC; preparo mínimo, com uma gradagem média e uma gradagem leve – PM; plantio direto, com semeadura sem preparo de solo – PD; e plantio direto com escarificação realizada no inverno a cada três anos – PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido). No ano de 2012, 23 anos após o início do experimento, foram determinados os atributos de fertilidade do solo nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm, bem como o estoque de P e K até a profundidade de 30 cm. Na safra 2012/2013 as culturas de aveia branca e soja foram avaliadas quanto à produtividade de grãos e de biomassa residual, composição e poder calorífico superior (PCS) da biomassa, e potencial teórico de produção de energia. A adoção de sistemas de preparo do solo por 23 anos proporcionaram diferenças sutis na maioria dos atributos químicos do solo, porém no PD, houve aumento da fração disponível de P e os métodos conservacionistas de solo promoveram acúmulo de matéria orgânica e de P total em relação ao PC, na camada 0-10 cm. A restrição de adubação promoveu redução na ordem de $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no estoque de K e também reduziu os teores de P disponível e de K^+ trocável, não trocável e total do solo, mas não influenciou nos teores totais e não diminuiu o estoque de P. A reserva total de P e K do solo, até 30 cm, variou de 712,5 a 811,5 kg ha^{-1} e de 619,6 a 921,4 kg ha^{-1} , respectivamente. A composição elementar e a produtividade de biomassa das duas culturas avaliadas foram afetadas pelos níveis de adubação e somente a aveia branca apresentou maior produtividade de biomassa nos métodos conservacionistas (PD e PDE). Não houve influência dos tratamentos sobre o PCS, sendo este, em média, de 17,9 MJ kg^{-1} para a aveia branca e de 18,2 MJ kg^{-1} para a soja. Concluiu-se que a nutrição das espécies avaliadas é alterada pelas condições de manejo do solo, o que reflete na produtividade e composição da biomassa das culturas. Contudo, essa diferença não é significativa a ponto de alterar a qualidade da biomassa em termos energéticos, o que indica que o potencial energético dos resíduos dessas duas espécies está limitado somente pela quantidade produzida.

Palavras-chave: Bioenergia. Resíduo da colheita. Composição da biomassa. P total no solo. K total no solo.

ENERGY FROM RESIDUAL BIOMASS OF OAT AND SOYBEAN IN RESPONSE OF TILLAGE SYSTEM AND FERTILIZATION LEVELS²

Author: Leticia de Pierri

Supervisor Professor: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Co-supervisor: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

Co-supervisor: Dr. Gabriel Barth

GENERAL ABSTRACT

In response to the growing demand for sustainable sources of energy, biomass waste grain crop has great potential as a feedstock for energy cogeneration, since this biomass is readily available and in a significant amount, especially in regions of high productivity as the region of Campos Gerais - PR. Among the various types of soil management adopted in a property, there is the wide acceptance of no-tillage as a method of tillage, combined with mineral fertilizer held annually, as recommended for each type of rotation cultures. The soil conservation systems as well as the annual application of soluble fertilizers cause changes in soil chemical properties, which implies different growth conditions for plants, especially with regard to its mineral nutrition. In response to these different growth environments, crops vary in relation to grain yield and biomass, as well as differences in the elemental composition of biomass waste, a fact that will affect the potential of this feedstock as energy input. The overall aim of this study was to assess the energy potential of biomass waste of oat (*Avena sativa* L.) and soybean [*Glycine max* (L.) Merr] in response to different growing environments provided by the management of soil conservation and fertility. Therefore, this work is composed of two chapters, which attempt to describe (i) the changes in fertility and in the stock of phosphorus (P) and potassium (K) of a soil under different tillage methods and fertilizer levels by 23 years; and (ii) the changes in the theoretical potential for energy production from waste biomass harvest of oat and soybean provided by long-term adoption of different methods of tillage and fertilization levels. A long-term experiment was implemented in 1989 in the city of Ponta Grossa (PR), with a combination of four methods of tillage

² Soil Science Master Dissertation. Graduate Program in Soil Science, Agricultural Sciences Sector, Federal University of Paraná. Curitiba. (53 p.) January, 2014.

(conventional tillage, with plowing and two light disking – CT; minimum tillage, with a average and a light disking - MT; no-tillage, seeding with no tillage – NT; and no-tillage plus chisel plough, held in winter every three years – NT+CP) and two levels of fertilization (normal and reduced). In 2012, 23 years after the start of the experiment, it was determined the attributes of soil fertility at 0-10, 10-20 and 20-30 cm depth as well as the stock of P and K to a depth of 30 cm. In the crop year of 2012/2013, crops of oat and soybean was evaluated for its grain and biomass residual yield, composition, high heating value (HHV), and theoretical potential for energy production. The adoption of tillage systems for 23 years provided subtle differences in soil chemical properties, but in NT, there was an increase in the available fraction of P and the conservation methods promoted organic matter and total P accumulation in relation to CT, in 10 cm depth. The reduced level of fertilization caused a reduction in order of $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in the stock of K and also reduced the levels of available P and exchangeable, non-exchangeable and total K^+ , but did not influence the total P and non-decreased the stock of P. The total P and K soil reserves, till 30 cm, varied by 712,5 to 811,5 kg ha^{-1} and by 619,6 to 921,4 kg ha^{-1} , respectively. The elemental composition of the biomass and productivity, of both crops, were affected by fertilizer levels and only oat showed higher biomass productivity in conservation methods (NT and NT+CP). There was no effect of treatments on HHV, this is, on average, of $17,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ to oat and to $18,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ to soybean. It was concluded that nutrition of species assessed is amended by conditions of soil management, reflecting in productivity and biomass composition of crops. However, this difference is not significant to the point of changing the quality of biomass in energetic terms, indicating that the energy potential of the waste of these two species is limited only by the quantity produced.

Key-Words: Bioenergy. Harvest waste. Biomass composition. Total P in soil. Total K in soil.

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é um país de dimensões continentais, que cresce cada vez mais em termos populacionais e econômicos, e, como consequência direta dessa expansão, ocorre um aumento da demanda por alimentos, fibras e energia. Dentro dessa visão, a produção de energia a partir da biomassa residual das culturas agrícolas surge como uma alternativa interessante, pois esse recurso apresenta a grande vantagem de gerar energia elétrica próxima ao local de consumo, reduzindo os gastos com transmissão, além de otimizar o uso da terra, produzindo alimentos e energia a partir de uma mesma unidade de área.

O Paraná se destaca na produção de grãos e cereais, principalmente em regiões com grande expressividade agrícola, como os Campos Gerais. Com isso, ocorre a produção simultânea de uma grande quantidade de biomassa residual por essas culturas, que em geral é destinada à cobertura do solo no sistema plantio direto. Embora haja uma certa preocupação em relação à remoção da cobertura do solo para destiná-la à geração de energia (Moebius-Clune et al., 2008), estudos relatam que a retirada parcial de biomassa tem efeitos irrelevantes no que diz respeito à conservação do solo e manutenção do teor de matéria orgânica (Tarkalson et al., 2009; Powers et al., 2011).

Os métodos conservacionistas de preparo do solo imprimem características químicas, físicas e biológicas distintas ao mesmo, modificando a fertilidade do solo e, consequentemente, o desenvolvimento das culturas (Deubel et al., 2011). No entanto, as conclusões a respeito dos efeitos dos métodos de preparo sobre as características do solo muitas vezes não são claras, devido ao curto tempo de avaliação dos experimentos. Portanto, experimentos de longa duração são importantes, pois permitem uma constatação mais exata sobre esses efeitos.

Da mesma maneira, o manejo da adubação interfere diretamente nos teores de nutrientes do solo, principalmente na fração disponível (em solução e trocável), podendo afetar até mesmo as frações menos disponíveis às plantas (Guo et al., 2000; Zhang et al., 2011). O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes à produção agrícola, principalmente em solos altamente intemperizados. Somado ao potássio (K), estes dois elementos representam uma grande parcela dos fertilizantes aplicados nos solos agrícolas brasileiros. Portanto, o manejo adequado da adubação fosfatada e potássica é necessário para maximizar a eficiência destes fertilizantes a fim de evitar seu uso excessivo, ou ainda, o esgotamento das

reservas do solo. Assim sendo, o manejo empregado ao solo, tanto no que diz respeito à sua conservação quanto à sua fertilidade química, pode alterar as relações quantidade/intensidade dos elementos no solo.

As alterações no ambiente de desenvolvimento das espécies agrícolas, principalmente no tocante à sua nutrição mineral, afeta a produtividade de grãos e de biomassa, além de promover diferenças na composição química e elementar dos resíduos. Dessa maneira, o potencial de exploração energética da biomassa residual da colheita de grãos pode ser afetado pelo manejo empregado à lavoura.

Dentre os diversos processos de conversão energética a partir da biomassa, a combustão direta é a maneira principal e mais tradicional, sendo responsável por 97 % da produção de bioenergia do mundo (Demirbas, 2004). A partir da combustão da biomassa vegetal nas caldeiras, se obtém energia térmica na forma de calor, que ao evaporar a água, forma um vapor de alta pressão que aciona uma turbina acoplada a um gerador, produzindo energia elétrica. Esse processo de produção simultânea de vapor e de eletricidade é conhecido como cogeração. No Brasil, o setor sucroalcooleiro é praticamente autossuficiente em energia elétrica, onde 95 % da eletricidade consumida pelas indústrias deste setor é proveniente da cogeração do bagaço da cana-de-açúcar (Lora & Andrade, 2009). A cana-de-açúcar também é matéria prima para outra importante tecnologia de conversão da biomassa em energia: o etanol obtido através da fermentação do açúcar é um dos principais combustíveis renováveis do mundo, especialmente no Brasil, após a implantação do programa Proálcool. Além dos processos já citados, outras tecnologias como a pirólise e a gaseificação da biomassa são utilizados, apesar de em proporção menor em relação à combustão direta.

Um dos parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da biomassa como matéria prima para a produção de energia é o poder calorífico (Telmo & Lousada, 2011). Desta maneira, a investigação das características químicas e elementares da biomassa residual é necessária, pois estas se correlacionam diretamente com o poder calorífico dos resíduos (Sheng & Azevedo, 2005) e, portanto, podem prever materiais com maior ou menor potencial para produção de energia em função de sua qualidade.

O objetivo geral do trabalho foi avaliar o potencial energético da biomassa residual da aveia branca e soja em resposta às diferenças de fertilidade do solo proporcionadas por métodos de preparo e níveis de adubação. Para tanto, este trabalho está composto por dois capítulos, que buscam descrever (i) as alterações na fertilidade e no estoque de P e K de um

solo submetido a diferentes métodos de preparo do solo e níveis de adubação por 23 anos; e (ii) as alterações no potencial teórico de produção de energia a partir da biomassa residual da colheita de aveia branca e soja proporcionadas pela adoção por longo prazo de diferentes métodos de preparo do solo e níveis de adubação.

LITERATURA CITADA

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30:219-230, 2004.

DEUBEL, A.; HOFMANN, B. & ORZESSEK, D. Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. *Soil & Tillage Research*, 117:85-92, 2011.

GUO, F.; YOST, R.S.; HUE, N.V.; EVENSEN, C.I. & SILVA, J.A. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1681-1689, 2000.

LORA, E.S. & ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:777–788, 2009.

MOEBIUS-CLUNE, B.N.; van ES, H.M.; IDOWU, O.J.; SCHINDELBECK, R.R.; MOEBIUS-CLUNE, D.J.; WOLFE, D.W.; ABAWI, G.S.; THIES, J.E.; GUGINO, B.K. & LUCEY, R. Long-term effects of harvesting maize stover and tillage on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 72:960-969, 2008.

POWERS, S.E.; ASCOUGH II, J.C.; NELSON, R.G. & LAROCQUE, G.R. Modeling water and soil quality environmental impacts associated with bioenergy crop production and biomass removal in the Midwest USA. *Ecological Modelling*, 222:2430-2447, 2011.

SHENG, C & AZEVEDO, J.L.T. Estimating the higher heating value of biomass fuel from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28:499-507, 2005.

TARKALSON, D.D.; BROWN, B.; KOK, H. & BJORNEBERG, D.L. Impact of removing straw from wheat and barley fields: a literature review. *Better Crops*, 93:17-19, 2009.

TELMO, C. & LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35:2634-2639, 2011.

ZHANG, H.M.; YANG, X.Y.; HE, X.H.; XU, M.G.; HUANG, S.M.; LIU, H. & WANG, B.R. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. *Pedosphere*, 21:154-163, 2011.

CAPÍTULO I. ATRIBUTOS QUÍMICOS E ESTOQUE DE P E K DE UM SOLO SUBMETIDO A MÉTODOS DE PREPARO E NÍVEIS DE ADUBAÇÃO POR 23 ANOS

RESUMO

O balanço de nutrientes em diferentes sistemas de preparo do solo pode influenciar tanto as frações trocáveis quanto as frações menos disponíveis dos minerais. Por outro lado, o cultivo sucessivo sem a devida reposição dos elementos exportados pela colheita pode levar a um esgotamento das reservas naturais do solo, o que, por consequência, promove declínio da produtividade das culturas a longo prazo. O objetivo do trabalho foi avaliar as alterações na fertilidade e no estoque de fósforo (P) e potássio (K) de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e níveis de adubação por 23 anos. Um experimento de longa duração foi implantado no ano de 1989 no município de Ponta Grossa (PR), onde avaliou-se quatro métodos de preparo do solo (preparo convencional, com uma aração e duas gradagens leves – PC; preparo mínimo, com uma gradagem média e uma gradagem leve – PM; plantio direto, com semeadura sem preparo de solo – PD; e plantio direto com escarificação realizada no inverno a cada três anos – PDE), combinados com dois níveis de adubação (normal e reduzido). No ano de 2012, 23 anos após o início do experimento, foram determinados os atributos de fertilidade do solo nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm, bem como o estoque de P e K até a profundidade de 30 cm. A adoção de sistemas de preparo do solo por 23 anos proporcionaram diferenças sutis na maioria dos atributos químicos do solo, porém no PD, houve aumento da fração disponível de P e os métodos conservacionistas promoveram acúmulo de MO e de P total em relação ao PC, na camada 0-10 cm. A restrição de adubação promoveu redução na ordem de $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no estoque de K e também reduziu os teores de P disponível e de K^+ trocável, não trocável e total do solo, mas não influenciou nos teores totais e não diminuiu o estoque de P. A reserva total de P e K do solo, até 30 cm, variou de 712,5 a 811,5 kg ha^{-1} e de 619,6 a 921,4 kg ha^{-1} , respectivamente. Concluiu-se que a condição geral de melhor fertilidade do solo ocorre nos métodos com nenhum (PD) ou com pouco (PDE) revolvimento, com manejo adequado da adubação.

Palavras-chave: Plantio direto. Reserva de nutrientes. Fertilização. Teores totais.

CHAPTER I. CHEMICAL ATTRIBUTES AND P AND K STOCK OF A SOIL UNDER 23 YEARS OF TILLAGE METHODS AND FERTILIZER LEVELS

ABSTRACT

The balance of nutrients in various tillage systems can influence both the exchangeable fractions as well as the less available fractions of minerals. On the other hand, the continuous cultivation without proper replacement of the elements harvested by crops can lead to an exhaustion of natural resources of the soil, which consequently promotes a decline in the crop productivity in long-term. The aim of this study was evaluate changes in fertility and in the stock of phosphorus (P) and potassium (K) of a soil under different tillage methods and fertilizer levels for 23 years. A long-term experiment was implemented in 1989 in the city of Ponta Grossa (PR), which evaluated four methods of tillage (conventional tillage, with plowing and two light disking – CT; minimum tillage, with a average and a light disking - MT; no-tillage, seeding with no tillage – NT; and no-tillage plus chisel plough, held in winter every three years – NT+CP) combined with two levels of fertilization (normal and reduced). In 2012, 23 years after the start of the experiment, it was determined the attributes of soil fertility at 0-10, 10-20 and 20-30 cm depth as well as the stock of P and K to a depth of 30 cm. The adoption of tillage systems for 23 years provided subtle differences in soil chemical properties, but in NT, there was an increase in the available fraction of P and the conservation methods promoted organic matter and total P accumulation in relation to CT, in 10 cm depth. The reduced level of fertilization caused a reduction in order of $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in the stock of K and also reduced the levels of available P and exchangeable, non-exchangeable and total K^+ , but did not influence the total P and non-decreased the stock of P. The total P and K soil reserves, till 30 cm, varied by 712,5 to 811,5 kg ha^{-1} and by 619,6 to 921,4 kg ha^{-1} , respectively. It was concluded that the general condition of better soil fertility occurs in methods with no (NT) or low (NT+CP) tillage, with appropriate management of fertilization.

Key-words: No-tillage. Nutrient reserves. Fertilization. Total contents.

1.1. INTRODUÇÃO

Devido aos benefícios contra a erosão, os métodos conservacionistas de preparo do solo vêm sendo cada vez mais adotados nos solos agricultáveis do mundo (Lal, 2008; Derpsch et al., 2010). No Brasil, grande produtor de grãos e cereais, não poderia ser diferente: a adoção do sistema plantio direto atingiu mais de 31,8 milhões de ha na safra 2011/2012 (FEBRAPDP, 2013), cerca de 63 % da área agrícola do país.

O plantio direto (PD) altera as características químicas, físicas e biológicas do solo (Silveira & Stone, 2001; Falleiro et al., 2003; Vogeler et al., 2009; Derpsch et al., 2010; Deubel et al., 2011), principalmente em função do não revolvimento da camada arável, que permite uma decomposição mais gradual da matéria orgânica. Em relação aos efeitos sobre os atributos químicos do solo, é notadamente conhecido que o PD promove uma estratificação dos nutrientes (Pauletti et al., 2005; Messiga et al., 2012), promovendo acúmulo principalmente de fósforo (P) e potássio (K) nas camadas superficiais (Pauletti et al., 2009; Pavinato et al., 2009; Deubel et al., 2011).

Neste sistema de cultivo a formação do gradiente químico ocorre por causa das aplicações de fertilizantes e corretivos em superfície sem incorporação, ou ainda pela incorporação de fertilizantes até aproximadamente 10 cm de profundidade, com o uso de mecanismos sulcadores no momento da semeadura. Aliado a isto, ocorre um bombeamento pelas raízes das plantas, que retiram os elementos das camadas mais profundas do solo (Andrist-Rangel et al., 2007; Zhang et al., 2011), depositando-os na superfície após sua decomposição (Deubel et al., 2011). O acúmulo de nutrientes na camada superficial do solo pode afetar a absorção pelas plantas, e, conseqüentemente, todo o seu desenvolvimento. Deubel et al. (2011) afirmam que, nos estágios iniciais de crescimento, o suprimento de P e K pelas camadas superficiais do solo pode ser suficiente para atender a demanda da planta, porém, essas camadas podem secar rapidamente em períodos de seca, o que ocasionaria uma indisponibilidade dos minerais; em adição, os baixos conteúdos nas camadas mais profundas (que permanecem úmidas por mais tempo) podem ser insuficientes para o suprimento contínuo destes nutrientes às culturas.

O P é um dos elementos mais limitantes à produção agrícola em solos altamente intemperizados (Lardy et al., 2002; Wang et al., 2014) e, somado ao nitrogênio (N) e K, perfazem grande parte dos fertilizantes solúveis aplicados aos solos agrícolas anualmente. A

fertilização é uma das práticas mais importantes na produção das culturas por causa de sua influência na disponibilidade imediata de nutrientes no solo (Liu et al., 2006).

As plantas absorvem preferencialmente as frações mais lábeis dos nutrientes, porém diversos trabalhos têm demonstrado a contribuição de formas menos disponíveis para a nutrição de P e K das plantas (Guo et al., 2000; Melo et al., 2005; Andrist-Rangel et al., 2007; Zhang et al., 2011; Faria et al., 2012; Rosolem et al., 2012). Desta forma, o manejo adequado dos fertilizantes, alinhado ao manejo do preparo do solo, é fundamental para que haja uma otimização da eficiência de uso dos nutrientes pelas culturas, a fim de se evitar a depleção e esgotamento das reservas naturais de P e K do solo.

O objetivo do trabalho foi avaliar as alterações na fertilidade e no estoque de P e K de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e níveis de adubação por 23 anos.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. ÁREA EXPERIMENTAL

Um experimento de longa duração foi implantado no município de Ponta Grossa (PR), no ano de 1989, sob um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura argiloarenosa (450 g kg⁻¹ argila, 450 g kg⁻¹ areia e 100 g kg⁻¹ silte), com relevo suave ondulado e clima subtropical úmido (Cfb), segundo Köppen. As coordenadas geográficas da área experimental são 25°00'53"S e 50°09'07"O.

Os tratamentos foram organizados em esquema *split-block* sob delineamento de blocos ao acaso com três repetições, em parcelas de 104,12 m². Os tratamentos consistem na combinação de quatro métodos de preparo do solo (preparo convencional, com uma aração e duas gradagens leves – PC; preparo mínimo, com uma gradagem média e uma gradagem leve – PM; plantio direto, com semeadura sem preparo de solo – PD; e plantio direto com escarificação realizada no inverno a cada três anos – PDE) e dois níveis de adubação (nível normal, com fertilização baseada na recomendação de pesquisa local; e nível reduzido, somente com adubação nitrogenada de cobertura nas culturas de milho, trigo e aveia branca).

No início do experimento, houve a aplicação de 304,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅ por meio do fertilizante misto granulado Yookarin (composição: 35 % P₂O₅ solúvel em ácido cítrico; 2 % N total; 10 % Ca; 1 % Mg; 4 % S; 0,1 % B e 1 % Si) e de 162 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl),

incorporados até 30 cm, em todas as parcelas do experimento. A calagem também foi realizada igualmente em todos os tratamentos, nos anos de 1989 (7,3 Mg ha⁻¹), 1992 e 1994 (2,0 Mg ha⁻¹ em cada ano). No ano de 1989 o calcário foi incorporado a 30 cm de profundidade e nos demais anos, a calagem foi realizada antes do preparo do solo (nos tratamentos com revolvimento do solo houve incorporação do calcário e nas parcelas sem revolvimento, a calagem foi realizada superficialmente sem incorporação). A adubação e o sistema de rotação de culturas realizados ao longo do experimento podem ser consultados no apêndice 1.

1.2.2. ANÁLISES

1.2.2.1. Atributos químicos do solo

Para a avaliação dos atributos químicos do solo foram realizadas amostragens nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm no dia 25/05/2012, utilizando-se trado calador, com 15 sub-amostras por parcela para compor a amostra composta. Posteriormente, as amostras de solo foram tamisadas, secas e analisadas quanto aos parâmetros de pH (CaCl₂), Al⁺³, H⁺+Al⁺³, K⁺ trocável, P-resina, Ca⁺², Mg⁺² e matéria orgânica (MO), segundo a metodologia descrita por Raij et al. (2001). Os parâmetros soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (T), capacidade de troca de cátions efetiva (t), saturação por bases (V %) e saturação por alumínio (m %) foram calculados a partir dos resultados determinados em laboratório.

A extração do K⁺ não trocável foi realizada em 10 g de solo e 25 ml de HNO₃ 1M, em banho de óleo a 113°C durante 30 min (Pratt, 1965). Após filtragem, completou-se o volume do extrato para 100 ml com água deionizada e determinou-se o K em solução através de fotômetro de chama. O K⁺ não trocável foi calculado realizando a subtração do K extraído com HNO₃ e o extraído pela resina (trocável).

Para determinação dos teores totais de P e K, utilizou-se uma adaptação do método 3052 da United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1996), onde aproximadamente 0,2500 g de solo foram acondicionados em frascos de reação, com 4 ml de HNO₃, 3 ml de HF e 1 ml de H₂O₂. Os frascos foram fechados e acondicionados em forno de micro-ondas modelo Ethos One (marca Milestone), e sofreram uma programação de 200°C, com rampa de aquecimento de 10 minutos, e 1000 W de potência. Após filtragem, determinaram-se os teores de P e K no extrato através de espectrofotometria de emissão

óptica com plasma indutivamente acoplado (Varian 720-ES) e fotômetro de chama, respectivamente.

1.2.2.2. Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada no ano de 2013, a partir do método da escavação (Blake & Hartge, 1986). Foram coletadas amostras de solo de duas trincheiras por parcela, através de um gabarito com dimensões de 0,5 x 0,25 m, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. O solo coletado foi pesado a campo e sub-amostrado, onde posteriormente determinou-se a umidade após secagem das sub-amostras em estufa a 100°C por 24 h.

A densidade do solo foi calculada considerando a área do gabarito, o peso do solo seco (após correção da umidade) e as profundidades amostradas, onde procedeu-se uma média aritmética das camadas 0-5 e 5-10 cm, para determinação da densidade na camada 0-10 cm.

1.2.2.3. Cálculo dos estoques de P e K

O estoque de P e K considerou os teores totais dos elementos no solo e a densidade de cada parcela. Posteriormente, realizou-se a correção dos estoques a partir da massa equivalente (Sisti et al., 2004), tomando como tratamento referência o método de preparo convencional com adubação reduzida. O cálculo da correção dos estoques de P e K pode ser observado na equação (1).

$$\text{estoque} = \sum_{i=1}^{n-1} P_i \text{ ou } K_i + \left[M_n - \left(\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{Ri} \right) \right] \cdot \left[\frac{P_n \text{ ou } K_n}{M_n} \right] \quad (1)$$

Onde P_i ou K_i representam o estoque de P ou K da primeira até a penúltima camada (Mg ha^{-1}); M_n a massa de solo na camada mais profunda (Mg ha^{-1}); M_i a massa de solo da primeira até a camada mais profunda (Mg ha^{-1}); M_{Ri} a massa de solo da primeira até a camada mais profunda, no tratamento referência (Mg ha^{-1}); e P_n ou K_n o estoque de P ou K na camada mais profunda (Mg ha^{-1}).

1.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para todos os dados, procedeu-se o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias ($p > 0,05$). Os resultados foram submetidos à análise de variância dentro de cada

profundidade (portanto, a profundidade não foi considerada um fator de variação) e, quando encontrada significância, procedeu-se a comparação das médias pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Utilizou-se, ainda, correlação linear de Pearson para melhor verificar os efeitos dos tratamentos sobre as variáveis em estudo. Para as análises estatísticas utilizou-se o software estatístico R[®], versão 2.15.1.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Não houve influência isolada do fator método de preparo do solo sobre os atributos químicos até 30 cm de profundidade (Tabela 1), havendo maior influência dos níveis de adubação, quase que restritamente na camada 0-10 cm. Porém houve interação significativa entre os métodos de preparo e os níveis de adubação para os atributos P-resina, MO e Mg^{2+} , na profundidade de 0-10 cm (Tabela 2).

Alguns trabalhos têm apontado que modificações na fertilidade do solo em decorrência dos sistemas de preparo (Pauletti et al., 2005) e aplicação de fertilizantes (Pauletti et al., 2009) podem levar longos períodos para serem detectados. Dentro dessa visão, mesmo após 23 anos de aplicação dos tratamentos, não houve influência dos métodos de preparo e níveis de adubação sobre a saturação por bases (V %), saturação por alumínio (m %) e nos teores de Al^{3+} trocáveis, assim como na soma de bases (SB), CTC potencial (T) e efetiva (t) (Tabela 1), salvo algumas diferenças sutis observadas. No entanto, é necessário considerar a amostragem de solo realizada no presente trabalho. Em geral, os trabalhos consideram uma maior estratificação do solo, avaliando os 5 cm superficiais (Blevins et al., 1983; DeMaria et al., 1999; Falleiro et al., 2003; Deubel et al., 2011), onde a observação de modificações em função de métodos de preparo do solo são mais constantes. Como no presente trabalho houve amostragem da camada 0-10 cm, pode ter havido uma diluição desses possíveis efeitos.

Tabela 1. Atributos químicos nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$); ns: não significativo; traços indicam interação entre os fatores.

	MO ⁽¹⁾		V ⁽²⁾		m ⁽³⁾		pH		H+Al ³⁺		H ⁺		Al ³⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		SB ⁽⁴⁾		T ⁽⁵⁾		T ⁽⁶⁾	
	g dm ⁻³		%				-		-----		-----		cmol _c dm ⁻³		-----		-----		-----		-----		-----	
0 – 10 cm																								
PD*	-		50,2	ns	3,3	ns	5,3	ns	3,7	ns	3,7	ns	0,07	ns	2,6	ns	-		4,0	ns	7,7	ns	4,1	ns
PC	-		43,5		3,4		5,0		3,5		3,4		0,07		1,7		-		2,9		6,4		3,0	
PM	-		43,2		4,7		5,0		3,5		3,4		0,08		1,6		-		2,9		6,3		2,9	
PDE	-		45,3		2,6		5,0		3,5		3,4		0,07		1,5		-		2,9		6,4		2,9	
normal**	-		36,8	ns	6,2	ns	4,8	b	4,2	a	4,1	a	0,12	ns	1,4	ns	-		2,6	ns	6,8	ns	2,7	ns
reduzido	-		54,3		0,9		5,3	a	2,9	b	2,9	b	0,03		2,3		-		3,7		6,7		3,8	
10 – 20 cm																								
PD*	25,0	ns	59,8	ns	2,1	ns	5,4	ns	2,6	ns	2,5	ns	0,04	ns	2,6	ns	1,4	ns	4,2	ns	6,8	ns	4,2	ns
PC	26,5		55,7		1,7		5,2		2,8		2,8		0,03		2,5		1,1		3,8		6,7		3,9	
PM	23,5		52,8		2,1		5,2		2,8		2,8		0,03		2,0		1,1		3,4		6,2		3,4	
PDE	25,0		54,3		2,7		5,2		2,9		2,8		0,07		2,4		1,1		3,8		6,6		3,8	
normal**	23,8	ns	45,1	ns	4,3	ns	5,0	b	3,3	ns	3,2	ns	0,09	ns	1,7	ns	0,9	ns	2,9	ns	6,2	ns	3,0	ns
reduzido	26,2		66,2		0,0		5,5	a	2,3		2,3		0,00		3,1		1,5		4,6		6,9		4,6	
20 – 30 cm																								
PD*	18,0	ns	59,0	ns	1,3	ns	5,6	ns	2,4	ns	2,3	ns	0,03	ns	2,1	ns	1,2	ns	3,5	ns	5,9	ns	3,6	ns
PC	16,5		54,5		2,0		5,3		2,3		2,2		0,04		1,7		1,0		2,9		5,1		2,9	
PM	18,5		55,2		2,0		5,3		2,4		2,4		0,02		2,1		1,0		3,2		5,6		3,2	
PDE	19,8		55,0		1,7		5,3		2,5		2,5		0,02		2,1		1,0		3,3		5,9		3,3	
normal**	16,8	ns	48,0	ns	3,5	ns	5,2	ns	2,7	ns	2,7	ns	0,05	ns	1,7	ns	0,9	ns	2,8	ns	5,5	ns	2,8	ns
reduzido	19,6		63,8		0,0		5,6		2,1		2,1		0,00		2,3		1,3		3,7		5,8		3,7	

⁽¹⁾MO = matéria orgânica; ⁽²⁾V = saturação por bases; ⁽³⁾m = saturação por alumínio; ⁽⁴⁾SB = soma de bases; ⁽⁵⁾T = capacidade de troca catiônica potencial; ⁽⁶⁾t = capacidade de troca catiônica efetiva; *valores médios dos dois níveis de adubação; **valores médios dos quatro métodos de preparo do solo.

Observou-se efeito significativo dos níveis de adubação sobre o pH do solo até a profundidade de 20 cm, sendo este sempre superior no nível reduzido. A adubação nitrogenada é considerada como a fonte primária de acidificação do solo, devido ao processo de nitrificação (Blevins et al., 1983). Isso pode explicar o comportamento observado, já que o nível normal de adubação recebe uma quantidade maior de nitrogênio, durante a fertilização de semeadura (Apêndice 1). Contudo, a maior contribuição para o processo de acidificação do solo, no caso deste trabalho, pode ser atribuída à maior exportação de cátions básicos pela colheita no nível normal de adubação. Como a calagem é realizada igualmente em todas as parcelas do experimento, em condição adequada de suprimento de nutrientes, as plantas produzem mais e, conseqüentemente, exportam mais bases do solo. Apesar da não significância estatística, observa-se que os menores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} são encontrados sempre no nível normal, em todas as profundidades do solo (Tabelas 1 e 2).

Aliado a isso, a adição constante de fertilizantes no nível normal, na forma de sais de K pode ter favorecido a lixiviação das bases do solo, fenômeno relatado por Ernani et al. (2007) e observado na tabela 1, onde há uma clara concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada 10-20 cm. Dessa maneira, pelo aumento da atividade do K^+ na solução do solo e devido à sua alta mobilidade no perfil, novos equilíbrios entre os cátions podem ter se estabelecido, onde parte do K^+ passou a ocupar a CTC do solo, deslocando dela o Ca^{2+} e Mg^{2+} . Quando as bases são removidas dos sítios de troca do solo, elas são substituídas por íons H^+ , que dissolvem a argila, liberando Al^{3+} e Mn^{2+} . A perda das bases e sua subsequente substituição por Al^{3+} e Mn^{2+} diminuem o pH do solo, particularmente na camada superficial onde ocorre a maior perda de bases (Blevins et al., 1983).

Os componentes da acidez ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e H^+) foram significativamente maiores no nível normal de adubação, na camada superficial do solo (Tabela 1), o que embasa a discussão acima. Contudo, é importante destacar que, de uma maneira geral, quanto ao pH do solo e aos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} , não há limitação severa ao crescimento das culturas em qualquer dos métodos de preparo e níveis de adubação (Raij et al., 1996).

No sistema PD houve maior teor de MO no nível reduzido de adubação em relação ao nível normal, na camada 0-10 cm (Tabela 2). O teor de MO do solo é determinado pelo balanço de carbono, ou seja, pelas relações de entradas e de saídas no sistema. A decomposição do material orgânico pela microfauna edáfica (que representa, portanto, uma via de saída) é influenciada por sua qualidade química, conforme afirma Clarholm (2002).

Ainda segundo a autora, a fertilidade do solo, principalmente em relação ao N e ao P, exerce influência sobre a qualidade química do material vegetal: em condições de baixa disponibilidade de P, ocorre maior produção de compostos fenólicos pelas plantas, o que implica em um material de degradação mais difícil pelas bactérias. Portanto, apesar de o aporte de MO via biomassa vegetal provavelmente ser menor no nível reduzido de adubação, a qualidade destes compostos pode ser inferior, o que resultou em uma decomposição mais lenta e, assim, em um material orgânico mais refratário no solo. Em complemento, é importante destacar que Pauletti et al. (2005), nesta mesma área, após 11 anos da instalação do experimento (2000), observaram teores de MO da camada 0-10 cm próximos aos deste trabalho (PD: 37,8 g dm⁻³; PC: 36,12 g dm⁻³; PM: 37,8 g dm⁻³; e PDE: 43,0 g dm⁻³), sendo este teor considerado médio em todas as situações. Isso indica, portanto, que pode estar havendo uma estabilidade dos teores de MO ao longo do tempo, especialmente nos sistemas conservacionistas.

Tabela 2. Desdobramento da interação entre os fatores para os atributos químicos (0-10 cm) de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras minúsculas (na linha) e maiúsculas (na coluna), para cada atributo, diferem estatisticamente (Tukey; p<0,05).

	P⁽¹⁾ ----- mg kg ⁻¹ -----				MO⁽²⁾ ----- g dm ⁻³ -----				Mg²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³ -----			
	normal		reduzido		normal		reduzido		normal		reduzido	
PD	38,6	Aa	7,1	Ab	30,7	Ab	36,7	Aa	0,6	Ab	1,7	Aa
PC	14,2	Ba	4,8	Ab	31,3	Aa	27,0	Ba	0,8	Aa	1,1	Aa
PM	15,9	Ba	5,5	Ab	32,0	Aa	34,3	ABa	0,7	Ab	1,3	Aa
PDE	22,5	Ba	4,9	Ab	33,7	Aa	34,7	Aa	0,8	Aa	1,3	Aa

⁽¹⁾P = P extraído por resina; ⁽²⁾MO = matéria orgânica.

Ainda no nível reduzido, observam-se maiores teores de MO nos métodos sem (PD) ou com pouco revolvimento (PDE e PM) na camada superficial do solo. O acúmulo de MO em superfície em sistemas conservacionistas de solo é relatado em diversos trabalhos (DeMaria et al., 1999; Falleiro et al., 2003; Liu et al., 2006; Vogeler et al., 2009; Derpsch et al., 2010), fato que também está relacionado à menor velocidade de decomposição nesses sistemas em comparação aos preparos com revolvimento do solo.

Com exceção ao K não trocável na profundidade 20-30 cm e ao K total na profundidade 10-20 cm, todas as frações de K do solo foram influenciadas pelo fator adubação até a profundidade de 30 cm, sendo superiores onde houve aplicação anual deste nutriente (Tabela 3). Este resultado indica a alta mobilidade do elemento em comparação a outros cátions (Fontoura et al., 2011), e ocorreu devido ao aumento da concentração de K^+ na solução em função da adição anual de fertilizantes potássicos, o que pode ter favorecido o deslocamento vertical do nutriente com o fluxo descendente de água (Flora et al., 2007). Contudo, não houve influência dos métodos de preparo sobre os teores de K do solo em nenhuma das três frações. Segundo Silveira & Stone (2001), em relação ao K, as pesquisas são divergentes no que tange à influência do preparo do solo, já que, segundo os autores, este elemento é bastante afetado pelo tipo de solo (textura e mineral de argila), regime de drenagem e quantidade adicionada pela adubação.

Observa-se que grande parte do K total do solo é representado pelo K^+ trocável, principalmente na camada 0-10 cm. Zörb et al. (2013) afirmam que a proporção média da fração trocável de K em relação à total varia de 1 a 2 %. Contudo, Curi et al. (2005) reforçam que a distribuição das formas de K pode diferir entre os solos. Sob esta ótica, como a adição anual do sal potássico aumentou os teores de K^+ trocável do solo em 3,3 vezes em relação ao nível reduzido, este aumento expressivo pode ter se refletido nos teores totais. Por outro lado, considerando a participação do teor trocável em relação ao total somente no nível reduzido, esta foi de 33, 18 e 18 %, para as três profundidades estudadas, respectivamente (Tabela 3). Estes resultados, portanto, não se distanciam dos obtidos por Silva et al. (2000), que encontraram contribuição de até 24 % do K trocável em relação ao total em condições naturais de um Latossolo Variação Una. Nas camadas mais profundas do solo há uma redução considerável do teor trocável de K, porém os teores totais permanecem pouco alterados (Tabela 3). Dessa maneira, provavelmente o K proveniente do material de origem contribuiu mais para os teores totais observados nas camadas 10-20 e 20-30 cm, enquanto que adubação potássica parece ter maior ligação com o K total na camada 0-10 cm.

A redução do K^+ trocável no nível reduzido em relação ao nível normal, após vinte e três anos sem adubação, foi da ordem de 69, 75 e 76 %, nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente. Por outro lado, a redução da fração não trocável, nas mesmas condições, foi de 88, 90 e 73 %, o que indica um esgotamento de maior magnitude no K^+ não trocável em resposta à restrição de adubação potássica. Diversos trabalhos têm apontado a

contribuição das frações não trocáveis de K para o suprimento às plantas (Melo et al., 2005; Andrist-Rangel et al., 2007; Zhang et al., 2011; Faria et al., 2012; Rosolem et al., 2012), principalmente quando há limitação de K no solo.

Os valores de K total do solo em questão são baixos, e concordam com os resultados obtidos por Silva et al. (2000), que encontraram uma variação no teor total de K em Latossolos de Minas Gerais variando de 4,2 a 9,1 mmol_c kg⁻¹ (que representam 165 a 359 mg kg⁻¹). Como o solo do presente experimento é originado pelo material de origem da Formação Ponta Grossa (Guimarães et al., 2007), que apresenta minerais relativamente pobres em K, justifica-se os baixos teores totais encontrados. Além disso, Faria et al. (2012) encontraram menores teores de K total em Latossolos quando comparados com Argissolos e Cambissolos, devido ao alto grau de intemperismo daqueles solos.

Os maiores teores de P-resina são observados na camada de 0-10 cm (Tabela 2). A concentração de nutrientes na camada superficial do solo em sistemas sem revolvimento, especialmente em relação ao P, é amplamente relatada e discutida na literatura (Silveira & Stone, 2001; Falleiro et al., 2003; Pauletti et al., 2009; Vieira et al., 2012), o que pode ser atribuído à baixa mobilidade desse elemento no solo e à aplicação superficial dos fertilizantes, sem incorporação ou incorporado a no máximo 10 cm de profundidade na linha de semeadura. Nesta camada de solo, no nível normal de adubação, o PD proporcionou os maiores teores de P-resina (Tabela 2), não diferindo dos demais métodos de preparo nas camadas mais profundas (Tabela 3), resultado parcialmente concordante com Pavinato et al. (2009), que relataram não haver aumento da fração lábil de P em resposta ao PD.

Após 23 anos sem a aplicação de P ao solo, o teor disponível deste nutriente na camada superficial foi reduzido para 18, 33, 34 e 22 % dos teores observados no nível normal de adubação, para os sistemas PD, PC, PM e PDE, respectivamente (Tabela 2), havendo influência da adubação até a profundidade de 20 cm (Tabela 3). Percebe-se que quanto maior o nível de revolvimento do solo, menor é a redução percentual em relação ao nível normal de adubação. No entanto, o teor de P disponível na camada superficial das parcelas adubadas no PD é 2,7 vezes maior que no PC (Tabela 2). Este efeito se deve principalmente ao maior contato deste nutriente com os sítios de adsorção (Al-Kaisi & Kwaw-Mensah, 2007; Wang et al., 2014) proporcionado pelo revolvimento (uma vez que não ocorre perdas por erosão devido ao relevo suave ondulado do local do ensaio) e também pela contribuição da MO na camada superficial nos sistemas PD e PDE, que podem aumentar a disponibilidade de P

devido à diminuição da adsorção desse elemento nos minerais (Lardy et al., 2002; Deubel et al., 2011).

Tabela 3. Teores (mg kg^{-1}) de potássio trocável (K_{tr}), não trocável (K_{ntr}) e total (K_{to}) e de fósforo resina (P_{res}) e total (P_{to}) de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$); ns: não significativo; traços indicam interação entre os fatores e valores entre parênteses representam a fração percentual no teor total.

	K _{tr}		K _{ntr}		K _{to}		P _{res}		P _{to}	
	----- mg kg ⁻¹ -----									
	0-10 cm									
PD*	91,2 (47)	ns	28,8 (15)	ns	195,2	ns	22,8 (9)	-	245,6	a
PC	117,3 (66)		2,7 (1)		177,4		9,7 (5)	-	204,7	c
PM	104,3 (57)		22,4 (12)		183,4		10,7 (5)	-	222,4	b
PDE	114,0 (69)		12,6 (7)		166,1		13,3 (6)	-	235,7	ab
normal**	163,6 (78)	a	29,7 (14)	a	208,7	a	22,7 (9)	-	247,5	a
reduzido	49,8 (33)	b	3,5 (2)	b	152,4	b	5,5 (3)	-	206,7	b
	10-20 cm									
PD*	65,8 (43)	ns	7,5 (5)	ns	154,2	ns	15,5 (8)	ns	187,1	ns
PC	67,1 (46)		9,5 (6)		145,8		10,7 (6)		178,6	
PM	63,2 (40)		8,4 (5)		157,0		8,7 (5)		166,8	
PDE	67,8 (40)		5,5 (3)		170,1		10,3 (6)		183,1	
normal**	105,9 (62)	a	14,1 (8)	a	170,8	ns	17,9 (10)	a	186,8	ns
reduzido	26,1 (18)	b	1,4 (1)	b	142,7		4,7 (3)	b	171,0	
	20-30 cm									
PD*	53,4 (41)	ns	6,5 (5)	ns	129,3	ns	6,7 (5)	ns	129,3	ns
PC	54,7 (34)		6,9 (4)		158,5		4,7 (4)		118,4	
PM	45,6 (29)		9,4 (6)		159,3		4,7 (4)		111,5	
PDE	52,1 (32)		4,5 (3)		162,5		4,8 (4)		132,9	
normal**	83,4 (43)	a	10,7 (5)	ns	193,2	a	6,9 (6)	ns	120,6	ns
reduzido	19,6 (18)	b	2,9 (3)		111,6	b	3,5 (3)		125,5	

*valores médios dos dois níveis de adubação; **valores médios dos quatro métodos de preparo do solo.

Apesar de baixa, a participação do P disponível no P total do solo é sempre maior nas parcelas adubadas (mais que o dobro) do que nas não adubadas, independente da camada avaliada (Tabela 3). Contudo, ao contrário do K, a fração de P extraída pela resina apresentou pouca participação percentual no P total do solo (de 3 a no máximo 10 %), mesmo onde houve aplicação de fertilizantes fosfatados. Este resultado é devido à alteração do P para

formas mais estáveis, e assim, menos disponíveis às plantas. Isso indica que mesmo quando os teores totais no solo são relativamente elevados, a quantidade de P prontamente disponível para as plantas pode ser limitante. É necessário considerar, porém, que a fixação do P no solo parece não ser um processo irreversível. Guo et al. (2000) afirmam que a fração inorgânica do P ligada aos óxidos de Fe e Al (extraída com NaOH), a longo prazo, parece repor o P para as frações mais lábeis (extraídas por resina e NaHCO_3), o que sugere que o P adicionado como fertilizante pode ser completamente recuperado ao longo do tempo. Por outro lado, por ser um processo lento, esse tamponamento do P não garantiria a produtividade máxima das culturas. Dentro dessa visão, a aplicação anual de fosfato é necessária para garantir o suprimento imediato deste nutriente às plantas.

Não houve variação entre os métodos de preparo quanto ao P extraído pela resina quando houve restrição da adubação (Tabela 2). Porém, considerando a média dos dois níveis de adubação, observou-se que os métodos conservacionistas de preparo apresentaram maior teor total de P, quando comparados ao PC (Tabela 3). Isso ocorreu, portanto, pela contribuição do P-resina acumulado no plantio direto no nível normal, conforme relatado anteriormente, e pela atuação da MO nos métodos PD e PDE nos tratamentos sem adubação, indicado pela correlação positiva entre P total e MO ($r = 0,72$; $p < 0,01$) na camada 0-10 cm, no nível reduzido de adubação. Isso indica que houve um efeito positivo dos métodos conservacionistas em relação à fração orgânica de P do solo, o que é particularmente importante em solos que não recebem adubação com fosfatos solúveis, já que o P na fração orgânica tem pouca expressividade no suprimento às plantas quando há quantidades significativas de P inorgânico (Guo et al., 2000), mas em condições naturais, pode contribuir significativamente para a presença desse elemento em solos altamente intemperizados (Lardy et al., 2002).

Os resultados encontrados no presente trabalho discordam parcialmente dos obtidos por Messiga et al. (2012), que não encontraram influência do PD em relação ao PC no que diz respeito aos teores totais de P do solo, mas que observaram maiores teores de P extraídos por Mehlich-3 e Olsen (ou seja, nas frações mais disponíveis) no sistema conservacionista. Contudo, os autores observaram aumento do P total em função da aplicação de fosfato ao solo até 15 cm de profundidade, o que também foi observado no presente experimento nos primeiros 10 cm (Tabela 3).

Os teores de P total encontrados foram comparáveis aos valores encontrados por Lardy et al. (2002) para o horizonte Bw de solos nativos do Cerrado brasileiro (que apresentaram um teor médio de 212 mg kg^{-1}), porém estão aquém dos teores encontrados pelos mesmos autores no horizonte A (média de 360 mg kg^{-1}), o que novamente indica o material de origem pobre do solo em questão.

1.3.2. ESTOQUES DE P E K

Os estoques totais de P e K até a profundidade de 30 cm podem ser observados na figura 1, que representam a influência isolada de cada fator (método de preparo e nível de adubação), uma vez que não houve interação entre eles.

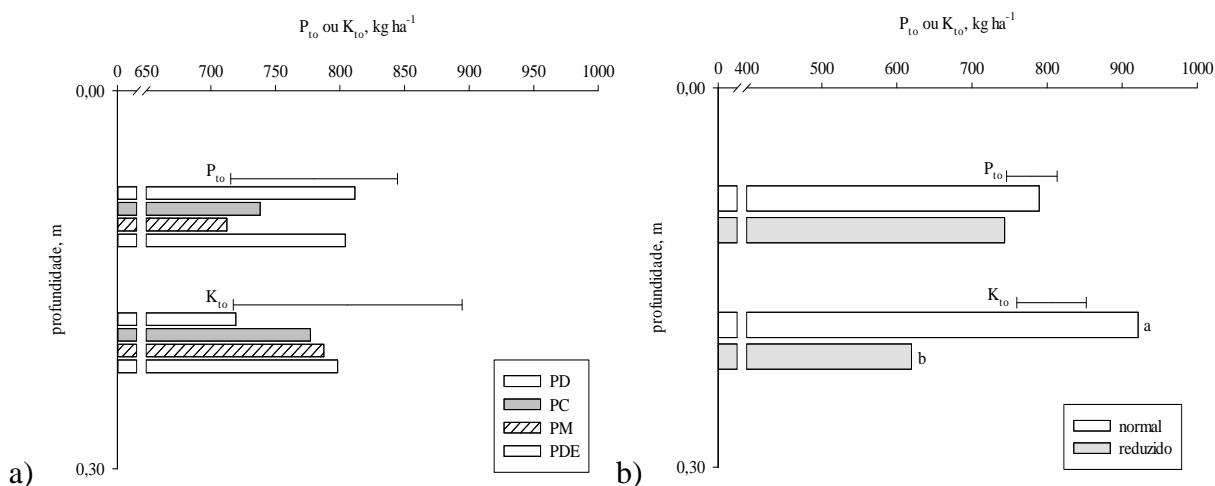


Figura 1. Estoque total de fósforo (P) e potássio (K), até 30 cm de profundidade, de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado a cada 3 anos, PDE) (a) e dois níveis de adubação (normal e reduzido) (b). As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey, $p < 0,05$).

O estoque de K total não diferiu estatisticamente entre os métodos de preparo (Figura 1a), porém este foi significativamente maior no nível normal de adubação (Figura 1b). O cultivo anual de espécies de verão e de inverno sem adubação por vinte e três anos promoveu um declínio no estoque de K total da ordem de $301,8 \text{ kg ha}^{-1}$ em relação à mesma condição, porém com a aplicação anual de KCl. Zhang et al. (2011), estudando os efeitos em longo prazo da adubação potássica no trigo e no milho em diversos solos da China, observaram uma

variação no requerimento anual dessas espécies de 9 a 26 kg ha⁻¹ de K, para produzir uma tonelada de grãos. Apesar de haverem diferenças de exigência entre espécies, isso pode indicar que, somente o requerimento anual para produzir uma tonelada de grãos, é maior do que a depleção observada no nível reduzido (aproximadamente 13 kg ha⁻¹ ano⁻¹). Desta maneira, por não haver a devida reposição de K via fertilizante, camadas mais profundas que 30 cm podem ter contribuído para suprir o K adicional, fato também observado no trabalho de Zhang et al. (2011).

Apesar da contribuição de formas não trocáveis e até mesmo estruturais para o suprimento de K às plantas, observado em diversos trabalhos no Brasil e no mundo, Rosolem et al. (2012) afirmam que a capacidade de suprimento de K depende mais do K recém adicionado do que do histórico de adubação potássica do solo. Dessa maneira, o suprimento residual de K por frações menos disponíveis possui um limite, a partir do qual a produtividade das espécies agrícolas é irreversivelmente prejudicada. Esta condição foi verificada no presente estudo, onde a soja cultivada no nível de adubação reduzido apresentou sintomas claros de deficiência de K, conforme pode se observar na figura 2.



Figura 2. Sintomas de deficiência de potássio (amarelecimento das bordas das folhas mais velhas) em plantas de soja cultivadas em parcelas sem aplicação deste nutriente por vinte e três anos.

Apesar dos maiores teores totais de P na camada 0-10 cm observados nos sistemas PD e PDE (Tabela 3), não houve diferença estatística para os estoques de P até 30 cm de profundidade em resposta aos métodos de preparo do solo (Figura 1a). A reserva de P total observada neste trabalho esteve próxima dos resultados obtidos por Prietzel & Stetter (2010),

que encontraram uma variação entre 647 e 1.792 kg ha⁻¹ de P total, até 30 cm de profundidade (dependendo dos tratamentos, locais e datas do estudo) em solos sob cultivo de *Pinus* na Alemanha, e estiveram um pouco acima dos resultados observados por Lardy et al. (2002), que encontraram um estoque total de P de, em média, 555 kg ha⁻¹, em diversos Latossolos do Cerrado brasileiro, porém para a camada 0-20 cm.

A ausência de adubação fosfatada durante vinte e três anos não diminuiu a reserva total de P, sendo que a diferença entre os níveis normal e reduzido de adubação foi de somente 46,3 kg ha⁻¹ (Figura 1b). O resultado observado pode indicar que as espécies cultivadas não utilizaram a reserva de P do solo, mesmo em uma condição severa de restrição deste nutriente, já que houve aplicação de uma quantidade expressiva de P₂O₅ (304,5 kg ha⁻¹) no início do experimento igualmente em todas as parcelas.

A dinâmica do P ao longo do tempo foi muito diferente do comportamento observado para o K. Isto ocorre em função da alta afinidade entre o fosfato e os óxidos de Fe e de Al (que provavelmente são expressivos no solo em questão, um Latossolo Vermelho), promovendo sua adsorção específica (Guo et al., 2000; Vogeler et al., 2009). Assim, mesmo que haja P no solo em quantidades consideráveis, esse elemento estará indisponível para as plantas no curto prazo. Contudo, essa reserva pode ser considerada importante fonte de P no longo prazo, já que estudos tem demonstrado a reversibilidade de formas menos lábeis de P para formas mais disponíveis (Guo et al., 2000).

1.4. CONCLUSÕES

- 1) O plantio direto aumenta a disponibilidade do P inorgânico do solo;
- 2) A adoção de diferentes sistemas de preparo do solo por 23 anos proporcionam diferenças sutis na maioria dos atributos químicos, considerando uma amostragem de 0-10 cm;
- 3) Os métodos conservacionistas proporcionam maiores teores de matéria orgânica e de P total na camada superficial do solo, o que pode ser importante em solos que não recebem aplicação de fertilizantes solúveis;
- 4) A restrição da adubação potássica durante 23 anos promove redução dos teores trocáveis, não trocáveis e totais de K, o que resulta na diminuição da reserva total de K do solo;
- 5) A não aplicação de P ao solo durante 23 anos diminui os teores de P disponível, mas não diminui o estoque total de P;

- 6) A condição geral de melhor fertilidade ocorre nos métodos conservacionistas de preparo do solo com manejo adequado de adubação.

1.5. LITERATURA CITADA

AL-KAISI, M. & KWAW-MENSAH, D. Effect of tillage and nitrogen rate on corn yield and nitrogen and phosphorus uptake in a corn-soybean rotation. *Agronomy Journal*, 99:1548-1558, 2007.

ANDRIST-RANGEL, Y.; EDWARDS, A.C.; HILLIER, S. & ÖBORN, I. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122:413-426, 2007.

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis. Part. 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. Madison, Ed. Madison, 1986. p. 363-382.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil & Tillage Research*, 3:135-146, 1983.

CLARHOLM, M. Bacteria and protozoa as integral components of the forest ecosystem – their role in creating a naturally varied soil fertility. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81:309-318, 2002.

CURI, N. KÄMPF, N. & MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T & ROBERTS, T.L. ed. *Potássio na agricultura brasileira*. 1. ed. Piracicaba, Potafós, 2005. p. 71-91.

DEMARIA, I.C.; NNABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 51:71-79, 1999.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. & HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3:1-26, 2010.

DEUBEL, A.; HOFMANN, B. & ORZESSEK, D. Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. *Soil & Tillage Research*, 117:85-92, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (BRASIL). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ERNANI, P.R. ; BAYER, C. ; ALMEIDA, J.A. & CASSOL, P.C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31 :393-402, 2007.

FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A. & FAGUNDES, J.L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:1097-1104, 2003.

FARIA, A.F.; ALVAREZ, V.V.H.; MATTIELLO, E.M.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; PAIVA, H.N. Capacidade de suprimento de potássio em solos de Minas Gerais – Brasil. *Spanish Journal of Soil Science*, 2:26-37, 2012.

FEBRAPDP, Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Evolução da área de plantio direto no Brasil. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf>. Acesso em: 23. Dez. 2013.

FLORA, L.P.D. ; ERNANI, P.R. & CASSOL, P.C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31 :1591-1598, 2007.

FONTOURA, S.M.V.; VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C. & MORAES, R.P. Camada diagnóstica e critérios de manejo da fertilidade de solos em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. 1. Ed. Guarapuava, Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2011. 64p.

GUIMARÃES, G.B.; MELO, M.S.; GIANINNI, P.C.F. & MELEK, P.R. Geologia dos Campos Geras. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007. p. 23-32.

GUO, F.; YOST, R.S.; HUE, N.V.; EVENSEN, C.I. & SILVA, J.A. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. Soil Science Society of America Journal, 64:1681-1689, 2000.

LAL, R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. Waste Management, 28:747-758, 2008.

LARDY, L.C.; BROSSARD, M.; ASSAD, M.L.L. & LAURENT, J.Y. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. Agriculture, Ecosystems & Environment, 92:147-158, 2002.

LIU, X.; HERBERT, S.J.; HASHEMI, A.M.; ZHANG, X. & DING, G. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review. Plant, Soil and Environmental, 52:531-543, 2006.

MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; RIBEIRO, A.N. & MASCHIO, P.A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do triângulo mineiro. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 29:533-545, 2005.

MESSIGA, A.J.; ZIADI, N.; MOREL, C.; GRANT, C.; TREMBLAY, G.; LAMARRE, G. & PARENT, L.E. Long term impact of tillage practices and biennial P and N fertilization on maize and soybean yields and soil P status. Field Crops Research, 133:10-22, 2012.

PAULETTI, V.; LIMA, M.R.; BARCIK, C. & BITTENCOURT, A. Evolução nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes métodos de preparo do solo. *Scientia Agraria*, 6:9-14, 2005.

PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V.; SERRAT, B.M.; FAVARETTO, N. & ANJOS, A. Atributos químicos de um Latossolo Bruno sob sistema plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:581-590, 2009.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A. & ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil & Tillage Research*, 105:149-155, 2009.

PRATT, P.F. Lithium, sodium and potassium. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis*. Parte 2. Chemical and microbiological properties. Madison, American Society of Agronomy, 1965. P. 225-246.

PRIETZEL, J. & STETTER, U. Long-term trends of phosphorus nutrition and topsoil phosphorus stocks in unfertilized and fertilized Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands at two sites in Southern Germany. *Forest, Ecology and Management*, 259:1141-1150, 2010.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. *Análise química do solo para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. *Recomendação de adubação e calagem para o estado do São Paulo*, 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996. 285p.

ROSOLEM, C.A.; VICENTINI, J.P.T.M.M. & STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:1507-1515, 2012.

SILVA, I.R.; FURTINI NETO, A.E.; FERNANDES, L.A.; CURI, N. & VALE, F.R. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:2065-2073, 2000.

SILVEIRA, P.M. & STONE, L.F. Teores de nutrientes e de matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistema de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:387-394, 2001.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 76:39-58, 2004.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. Method 3052. 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3052.pdf>>. Acesso em: 11. Dez. 2013.

VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ANGHINONI, I; ERNANI, P.R. & MORAES, R.P. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em latossolos sob plantio direto no centro-sul do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:188-198, 2012.

VOGELER, I.; ROGASIK, J.; FUNDER, U.; PANTEN, K. & SCHNUG, E. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. *Soil & Tillage Research*, 103:137-143, 2009.

WANG, E.; BELL, M.; LUO, Z.; MOODY, P. & PROBERT, M.E. Modelling crop response to phosphorus inputs and phosphorus use efficiency in a crop rotation. *Field Crops Research*, 155:120-132, 2014.

ZHANG, H.M.; YANG, X.Y.; HE, X.H.; XU, M.G.; HUANG, S.M.; LIU, H. & WANG, B.R. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. *Pedosphere*, 21:154-163, 2011.

ZÖRB, C. SENBAYRAM, M. & PEITER, E. Potassium in agriculture – status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008> (artigo no prelo).

CAPÍTULO II. ENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL DE AVEIA BRANCA E SOJA EM FUNÇÃO DO MANEJO DO SOLO

RESUMO

Com a crescente demanda por fontes renováveis de energia, a biomassa residual da colheita de grãos surge como uma importante alternativa. Contudo, a quantificação do potencial de produção de energia desses resíduos e o conhecimento dos fatores que podem alterar esse potencial são necessários para a exploração adequada desta fonte de energia. A produtividade de grãos e de biomassa, assim como a composição química e elementar da biomassa estão intimamente relacionados com a nutrição das plantas, que por sua vez, pode ser alterada pelo manejo e fertilidade do solo. Entre as espécies mais cultivadas no mundo estão a soja e a aveia branca, que, por consequência, geram uma quantidade expressiva de biomassa residual. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações no potencial teórico de produção de energia a partir da biomassa residual da colheita de aveia branca e soja proporcionadas pela adoção por longo prazo de diferentes métodos de preparo do solo e níveis de adubação. Para isso, utilizou-se um experimento implantado em 1989, em Ponta Grossa, região subtropical do Brasil, onde a biomassa residual da aveia branca (safra 2012) e da soja (safra 2012/2013) foram coletadas, moídas e analisadas quanto à sua composição química, elementar e poder calorífico superior (PCS). Adicionalmente, determinaram-se a produtividade de grãos, de biomassa e o potencial teórico de produção de energia de ambas as culturas. A adubação e os sistemas de preparo com pouco revolvimento do solo (PD e PDE) aumentaram a produtividade de grãos e de biomassa da aveia branca, porém a soja respondeu somente à adubação. Os diferentes níveis de fertilidade do solo proporcionaram alterações na composição química e elementar das duas culturas, porém não houve influência dos tratamentos sobre o PCS, sendo este, em média, de $17,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ para a aveia branca e de $18,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ para a soja. Com isso, o potencial energético dos resíduos das duas espécies avaliadas limita-se somente pela quantidade de biomassa produzida.

Palavras-chave: Bioenergia. *Avena sativa* L. *Glycine max* (L.) Merr. Teor de cinzas.

CHAPTER II. RESIDUAL BIOMASS ENERGY OF OAT AND SOYBEAN AS A FUNCTION OF SOIL MANAGEMENT

ABSTRACT

With the growing demand for renewable energy sources, residual biomass of harvesting grain emerges as an important alternative. However, the quantification of the cogeneration potential of these wastes and knowledge of the factors that can alter this potential are required for appropriate exploration of this energy source. The grain and biomass yield, as well as chemical and elemental composition of biomass, are closely related to plant nutrition, which in turn, can be altered by management and soil fertility. Among the major species cultivated worldwide are soybean and oat, which consequently generates a significant amount of residual biomass. Thus, the aim of this study was to evaluate the changes in the theoretical potential of energy production from residual biomass of oat and soybean harvest provided by long-term adoption of different tillage methods and fertilizer levels. For this, it was used an experiment implanted in 1989, in Ponta Grossa, subtropical region of Brazil, where the residual biomass of oat (harvest year 2012) and soybean (harvest year 2012/2013) were collected, ground and analyzed for their chemical and elemental composition and higher heat value (HHT). Additionally, it was determined the grain and biomass yield as well as the potential of energy production of both crops. The fertilization and tillage systems with low soil disturbance (NT and NT+CP) increased the grain and biomass yield of oat, but soybean responded only fertilization. The different fertility levels provided amendments in chemical and elemental composition of both crops, however, there was no influence of treatments on HHT, this is, on average, of 17,9 MJ kg⁻¹ to oat and to 18,2 MJ kg⁻¹ to soybean. With it, the waste energy potential of the two species evaluated is limited only by the amount of biomass produced.

Key-Words: Bioenergy. *Avena sativa* L. *Glycine max* (L.) Merr. Ash content.

2.1. INTRODUÇÃO

A população mundial já ultrapassou os sete bilhões de habitantes, o que resulta em um aumento constante na demanda por alimentos, fibras e energia. Para suprir este crescimento na demanda energética, a utilização de fontes alternativas, como a biomassa, vem aumentando nas últimas décadas. A biomassa moderna, ou seja, aquela destinada à produção de bioeletricidade e de biocombustíveis é responsável por suprir 6,8 % da eletricidade no Brasil (EPE, 2013). Contudo, diversos programas objetivam aumentar o uso da biomassa como fonte de energia no país (Lora & Andrade, 2009).

Dentro dessa visão, a biomassa residual da agricultura apresenta um grande potencial como insumo energético (Hoskinson et al., 2007), principalmente em países com expressividade agrícola (Lal, 2008). Em algumas regiões destes países, grandes aportes de resíduos dos cultivos têm sido depositados anualmente sobre o solo, como no estado do Paraná (Brasil), considerado o segundo maior produtor das culturas de aveia branca (171,8 Gg) e soja (15.948 Gg) do país (CONAB, 2013). Devido a esta condição e ao clima ameno de algumas regiões, pode haver dificuldade na decomposição da biomassa, o que favorece os problemas de germinação e a disseminação de doenças (Andrews, 2006).

Por outro lado, a retirada da matéria vegetal que recobre o solo ainda é motivo de preocupação, especialmente no sistema plantio direto, devido aos benefícios que a palhada exerce na proteção contra a erosão hídrica e eólica (Lal, 2008; Moebius-Clune et al., 2008; Tarkalson et al., 2009). Alguns trabalhos (Andrews, 2006; Powers et al., 2011), no entanto, demonstram que a retirada de 25 a 30 % dos resíduos das culturas não causa impacto negativo sobre o solo, permitindo ainda a manutenção de 93 % da cobertura do mesmo.

O potencial energético dos resíduos agrícolas é definido pela produtividade de biomassa e pela qualidade do material como insumo energético, onde o poder calorífico superior (PCS) é o principal parâmetro que expressa essa qualidade (Telmo & Lousada, 2011; Protásio et al., 2012). Por outro lado, as características químicas e elementares (Demirbas, 2004; Demirbas & Demirbas, 2004; Sheng & Azevedo, 2005), além do conteúdo de cinzas da matéria prima vegetal (Blander & Pelton, 1997; Allica et al., 2001) também são considerados parâmetros importantes para a caracterização da qualidade energética dos resíduos.

O manejo empregado a uma lavoura, que inclui o método de preparo do solo e a adubação, afeta significativamente os atributos químicos do solo (Blevins et al., 1983; Amaral

& Anghinoni, 2001; Vieira et al., 2012) e, conseqüentemente, pode afetar a produtividade das culturas (Messiga et al., 2012) e a composição da biomassa (Al-Kaisi & Kwaw-Mensah, 2007; Paula et al., 2011; Marcelo et al., 2012), o que reflete no potencial energético da mesma. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações no potencial teórico de produção de energia a partir da biomassa residual da colheita de aveia branca e soja proporcionadas pela adoção por longo prazo de diferentes métodos de preparo do solo e níveis de adubação.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado em Ponta Grossa (PR - Brasil) no ano de 1989 (coordenadas geográficas 25°00'53"S e 50°09'07"O), sob um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) de textura argiloarenosa (450 g kg⁻¹ argila, 450 g kg⁻¹ areia e 100 g kg⁻¹ silte), em relevo suave ondulado e clima subtropical (Cfb).

Os tratamentos foram organizados em esquema *split-block* sob delineamento de blocos ao acaso com três repetições, em parcelas de 104,12 m². Os tratamentos foram uma combinação de quatro métodos de preparo do solo (preparo convencional, com uma aração e duas gradagens leves – PC; preparo mínimo, com uma gradagem média e uma gradagem leve – PM; plantio direto, com semeadura sem preparo de solo – PD; e plantio direto com escarificação realizada no inverno a cada três anos – PDE) e dois níveis de adubação (nível normal, com fertilização baseada na recomendação de pesquisa local; e nível reduzido, somente com adubação nitrogenada de cobertura nas culturas de milho, trigo e aveia branca). O histórico de adubações e a rotação de culturas adotada ao longo do experimento podem ser observados no apêndice 1 e os atributos químicos da camada arável do solo, determinados segundo metodologia de Raij et al. (2001), após vinte e três anos de manejo, podem ser observados na tabela 1.

Na safra agrícola 2012/2013 foram cultivadas, no ciclo de inverno, a cultura de aveia branca (cultivar URS Guapa), e no ciclo de verão a cultura da soja (cultivar NA5909RG), com espaçamento de 0,17 m e 0,40 m entrelinhas, respectivamente. A precipitação mensal ocorrida

no município de Ponta Grossa no período de desenvolvimento das culturas pode ser observada na figura 1.

Tabela 1. Análise química de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (médias das camadas 0-10 e 10-20 cm).

	P⁽¹⁾	MO⁽²⁾	V⁽³⁾	m⁽⁴⁾	pH	H+Al³⁺	Al³⁺	K⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	t⁽⁵⁾
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%	-	-	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	-----
0-20 cm											
PD*	20,39	30,78	55,00	2,73	5,39	3,16	0,06	0,20	2,63	1,24	4,15
PC	10,00	28,28	49,59	2,60	5,08	3,17	0,05	0,24	2,09	1,02	3,43
PM	10,00	29,94	48,00	3,41	5,10	3,15	0,06	0,22	1,84	1,04	3,16
PDE	12,33	31,11	49,83	2,65	5,10	3,18	0,07	0,24	1,98	1,09	3,38
normal**	21,78	30,30	40,95	5,26	4,92	3,76	0,11	0,35	1,59	0,78	2,87
reduzido	5,33	31,77	60,26	0,43	5,42	2,62	0,02	0,10	2,68	1,37	4,20

⁽¹⁾P = fósforo extraído por resina; ⁽²⁾MO = matéria orgânica; ⁽³⁾V = saturação por bases; ⁽⁴⁾m = saturação por alumínio; ⁽⁵⁾t = capacidade de troca catiônica efetiva; *valores médios dos dois níveis de adubação; **valores médios dos quatro métodos de preparo do solo.

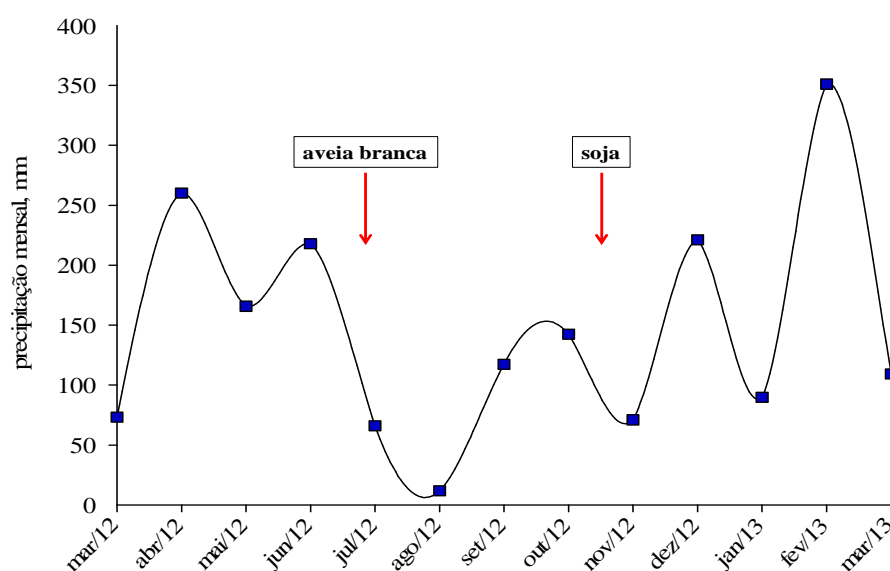


Figura 1. Precipitação mensal (mm) ocorrida no município de Ponta Grossa - Brasil entre março de 2012 e março de 2013. Fonte: SEAB/DERAL (2013), adaptado. As flechas indicam as datas de semeadura da aveia branca (29/06/2012) e da soja (16/11/2012).

2.2.2. ANÁLISES

2.2.2.1. Produtividade de grãos e de biomassa residual

No ponto de maturidade fisiológica, realizou-se a colheita com colhedora automotriz de parcelas, de sete linhas de sete metros e três linhas de sete metros, para as culturas da aveia branca e soja, respectivamente. As amostras foram separadas em grãos e biomassa residual (recolhida saca-palhas da colhedora), sendo então determinadas as produtividades de grãos (PG), corrigindo a umidade para 130 g kg^{-1} , e de biomassa residual colhida. Posteriormente, coletaram-se três linhas de 0,5 m e duas linhas de 1 m, para aveia branca e soja, respectivamente, da biomassa residual que permaneceu no campo (em decorrência da altura de corte), realizando-se a soma desta fração à biomassa residual colhida para a determinação da biomassa residual total (BRT).

Em sub-amostras da biomassa residual colhida foi realizada a determinação do teor de umidade, após secagem em estufa a 60°C até peso constante. Com o teor de umidade, realizou-se a correção da BRT para kg de matéria seca. Depois de secas, as sub-amostras, foram moídas em moinho de facas modelo Willye para as análises posteriores.

2.2.2.2. Composição da biomassa residual

Foram determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) do material vegetal das duas espécies através de combustão seca em analisador elementar (modelo Vario EL III[®]), sendo o teor de oxigênio (O) obtido por diferença (Protásio et al., 2012). Os nutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), sódio (Na), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram extraídos por digestão ácida (Martins & Reissmann, 2007), e o nutriente silício (Si), por digestão básica (Furlani & Gallo, 1978), com posterior determinação destes elementos por espectrofotometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (Varian 720-ES). Após a obtenção dos teores de cada elemento, calculou-se o conteúdo considerando a BRT.

O teor de cinzas do material vegetal foi determinado segundo metodologia adaptada, descrita em García et al. (2012), onde ocorre a calcinação de 1,000 g de amostra em cadinho de porcelana em forno mufla a 500°C por três horas. Após esse procedimento, calculou-se a composição percentual das cinzas em relação aos óxidos dos minerais, a partir da composição elementar anteriormente determinada.

Determinaram-se, ainda, as frações químicas da biomassa (teores de lignina, celulose e hemicelulose) através do sistema ANKOM, conforme descrito em Berchielli et al. (2001). Por se tratar de uma caracterização, essa análise foi realizada somente para os tratamentos contrastantes (ou seja, para o PD com adubação normal e para o PC com adubação reduzida). Através desta metodologia obtêm-se os teores de fibra em detergente ácido (FDA), fibra em detergente neutro (FDN) e lignina, sendo os teores de celulose e hemicelulose obtidos pelas diferenças entre FDA e lignina e entre FDN e FDA, respectivamente.

2.2.2.3. Poder calorífico e potencial teórico de produção de energia

O PCS foi determinado utilizando calorímetro adiabático modelo IKA-WERKE® C5000, segundo a norma 8633 (ABNT, 1984). A partir do teor de hidrogênio das amostras, foi determinado o poder calorífico inferior (PCI) em base seca, conforme descrito em Kollmann & Côté (1968) e segundo demonstra a equação (1).

$$PCI = PCS - 600 \times 9 \times \left(\frac{H}{100}\right) \quad (1)$$

Onde PCI representa o poder calorífico inferior, em kcal kg⁻¹; PCS o poder calorífico superior, em kcal kg⁻¹; 600 o calor latente de vaporização da água a 20°C, em kcal kg⁻¹; 9 a massa de água formada na combustão para cada 1 kg de H na biomassa, em kg; e H o teor de hidrogênio na biomassa, em %.

A conversão dos valores de PCS para MJ kg⁻¹ foi realizada considerando-se um fator de conversão de 4,18 x 10⁻³. Para o cálculo do potencial teórico de produção de energia elétrica a partir da biomassa residual das culturas utilizou-se a equação (2), baseada em informações de Nogueira & Lora (2003), Andrews (2006) e EPE (2013).

$$PPE = \left\{ \frac{[(BRT \times PCI) \times 0,3]}{860} \right\} \times 0,2 \quad (2)$$

Onde PPE representa o potencial teórico de produção de energia, em kWh ha⁻¹; BRT a biomassa residual total, em kg ha⁻¹; PCI o poder calorífico inferior, em kcal kg⁻¹; 0,3 a porcentagem de retirada da BRT do campo (30 %); 860 a equivalência entre as unidades kcal e kWh; e 0,2 a eficiência média de caldeiras em conversão elétrica (20 %).

2.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Realizou-se o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias (p>0,05), com posterior análise de variância (ANOVA) dos dados. Quando encontrada significância,

procedeu-se a comparação das médias pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade, com exceção aos resultados de lignina, celulose e hemicelulose, para os quais não foi realizada análise estatística. Utilizou-se, ainda, correlação linear de Pearson entre as variáveis. Para todas as análises estatísticas utilizou-se o software estatístico R[®], versão 2.15.1.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE BIOMASSA

Não houve interação entre os fatores em relação à PG e BRT de ambas as culturas (Figura 2), porém as duas espécies responderam de forma distinta aos tratamentos empregados.

A cultura da aveia branca apresentou maior PG no sistema PD, que foi superior ao PC, e maior BRT nos métodos conservacionistas de preparo do solo (PD e PDE) (Figura 2a e c), o que pode ser atribuído à melhor condição geral de fertilidade da camada arável nesses sistemas (Tabela 1). Por outro lado, os métodos de preparo não influenciaram a produtividades de grãos e biomassa residual total da cultura da soja, sendo a média de produtividade da safra 2012/13 de 3.207 kg ha⁻¹ de grãos e 2.185 kg ha⁻¹ de biomassa residual. Desta maneira, outro fator de caráter relevante que pode justificar a resposta da aveia branca e a ausência de resposta da soja aos métodos de preparo do solo foi o déficit hídrico ocorrido durante o desenvolvimento da aveia (Figura 1): como a palhada de cobertura promove uma maior manutenção da umidade do solo, a aveia branca pode ter sentido menos os efeitos do veranico nos sistemas conservacionistas.

Al-Kaisi & Kwaw-Mensah (2007) afirmam que o preparo do solo e o manejo da fertilidade influenciam a dinâmica de nutrientes do sistema solo-planta, que por sua vez, faz com que haja alterações na eficiência de uso dos nutrientes. Dentro dessa visão, apesar de não ter havido influência dos métodos de preparo sobre a produtividade da soja, observou-se uma maior eficiência da adubação fosfatada e potássica no PD, onde houve um aumento adicional de aproximadamente 6 kg ha⁻¹ de grãos de soja quando comparado com o PC, para cada 1 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O aplicado.

Os trabalhos relatados na literatura divergem quanto às melhorias no rendimento das culturas influenciadas pelo manejo do solo, havendo relatos de não influência (Bayer et al.,

1998; Pauletti et al., 2003; Vogeler et al., 2009), ou ainda, ora apontando para a maior eficiência do plantio direto (Costa et al., 2003; Chen et al., 2011), ora para os sistemas que revolvem o solo (Silveira & Stone, 2003; Chen et al., 2011; Messiga et al., 2012). Segundo Chen et al. (2011), as respostas de produtividade em função do manejo da cobertura do solo são complexas e parecem diferir entre regiões geográficas e entre espécies.

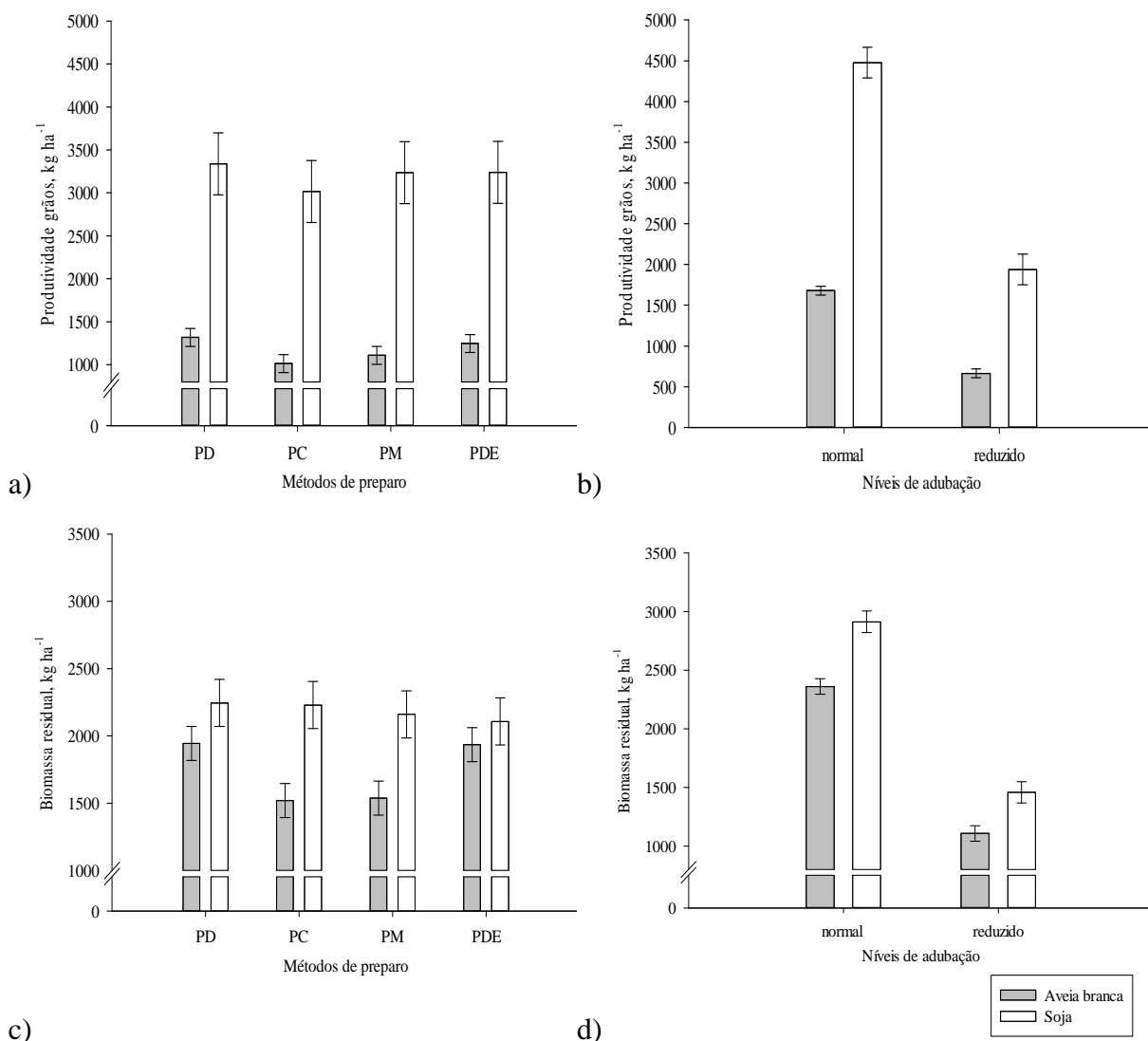


Figura 2. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) (a e b) e de biomassa residual (kg ha⁻¹) (c e d) de aveia branca e soja em função de quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido). As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey, p < 0,05).

Em relação aos níveis de adubação, estes afetaram a PG e BRT para ambas as culturas, sendo significativamente maior no nível normal de adubação (Figura 2b e d). Este resultado provavelmente ocorreu devido à forte limitação de P e K da camada arável do solo no nível reduzido, que se encontravam em teores muito baixo e baixo (Tabela 1), respectivamente (Raij et al., 1996). A aveia branca produziu 2,5 vezes mais grãos e 2,1 vezes mais biomassa residual no nível normal em relação ao nível reduzido, e a soja teve um acréscimo de produtividade de 2,3 e 1,9 vezes superior nesta mesma condição, para grãos e biomassa residual respectivamente. Em relação às leguminosas, os cereais de inverno são mais exigentes em K e P (Fontoura et al., 2010; Vieira et al., 2012); dessa maneira, as gramíneas se mostram mais responsivas quando se corrige a limitação de fertilidade do solo.

2.3.2. COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA

Com exceção aos teores de P na biomassa da aveia branca e Al na biomassa da soja, que foram superiores nos métodos de preparo que proporcionaram algum revolvimento do solo (PC e PM), os demais teores de elementos não sofreram alterações em decorrência dos métodos de preparo (Tabelas 2 e 3). Contudo, os níveis de adubação afetaram significativamente os teores de N, Ca, Mg e K da biomassa residual da aveia branca, assim como os teores de Mg, K, Si e Al da biomassa residual da soja, sendo sempre maiores no nível reduzido de adubação.

De maneira geral, mesmo para os elementos avaliados onde não foi observada diferença estatística, há um efeito claro de diluição no nível normal de adubação e em condições de pouco revolvimento do solo (PD e PDE). A exceção foi o K, que foi maior na biomassa das duas culturas no nível normal de adubação devido ao aporte anual deste nutriente.

O efeito de diluição é constatado pelo conteúdo de nutrientes, que é maior nos tratamentos com nível normal de adubação em relação ao nível reduzido, e nos métodos PD e PDE (estatisticamente superiores para o C, H, O, Ca e Mg da biomassa da aveia branca) (Tabelas 2 e 3). Para o cálculo do conteúdo de nutrientes, leva-se em consideração o teor do elemento e a produtividade de biomassa; com isso, apesar de, no geral, os teores serem menores, a produtividade de biomassa é maior nos tratamentos com adubação e sem revolvimento.

Tabela 2. Teor e conteúdo de nutrientes na biomassa residual de aveia branca (safra 2012) submetida a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$); ns: não significativo.

	C		N		H		S		O		Ca		Mg		K		P		Si		Al		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	----- % -----								----- g kg ⁻¹ -----								----- mg kg ⁻¹ -----															
	teor																															
PD*	42,3	ns	0,5	ns	6,2	ns	0,3	ns	45,4	ns	2,2	ns	1,9	ns	17,4	ns	0,1	b	6,6	ns	236,2	ns	333,1	ns	4,1	ns	191,7	ns	57,5	ns	30,6	ns
PC	42,1		0,5		6,2		0,4		45,0		2,1		1,8		19,4		0,2	a	8,8		309,9		349,8		4,0		244,2		82,7		28,3	
PM	42,1		0,5		6,2		0,3		45,4		2,2		1,8		18,7		0,2	ab	7,1		348,1		400,0		3,7		274,4		73,2		58,0	
PDE	42,4		0,4		6,2		0,3		45,8		2,0		1,7		16,0		0,1	b	7,4		242,3		433,0		4,1		160,9		74,7		31,2	
normal**	42,2	ns	0,4	b	6,1	ns	0,6	ns	45,0	ns	2,0	b	1,5	b	21,0	a	0,18	ns	6,8	ns	205,8	ns	358,2	ns	3,3	ns	153,6	ns	100,8	ns	33,8	ns
reduzido	42,3		0,6	a	6,2		0,1		45,8		2,3	a	2,1	a	14,8	b	0,17		8,1		362,5		399,8		4,7		282,0		43,3		40,3	
	conteúdo																															
	----- kg ha ⁻¹ -----																----- g ha ⁻¹ -----															
PD*	823,3	a	8,7	ns	119,9	a	6,9	ns	881,6	a	4,1	a	3,5	a	35,4	ns	0,3	ns	12,7	ns	441,6	ns	634,3	ns	7,6	ns	354,0	ns	124,6	ns	60,1	ns
PC	639,5	b	7,6		93,2	b	9,3		681,5	b	3,1	b	2,6	b	31,3		0,3		12,7		420,6		540,6		5,6		319,9		147,6		37,9	
PM	647,9	b	7,3		94,5	b	5,4		694,6	b	3,2	b	2,6	b	30,6		0,3		10,4		417,6		611,8		5,4		327,8		132,2		79,9	
PDE	819,5	a	8,0		119,5	a	7,2		881,5	a	3,8	ab	3,1	ab	34,6		0,3		12,9		429,5		785,6		7,3		297,6		172,1		64,8	
normal**	996,7	a	9,3	a	144,4	a	13,6	ns	1.063,0	a	4,6	a	3,5	a	49,5	a	0,4	a	15,8	ns	485,1	ns	846,3	a	7,8	ns	361,3	ns	240,9	ns	80,2	ns
reduzido	468,3	b	6,5	b	69,2	b	0,9		507,1	b	2,5	b	2,4	b	16,5	b	0,2	b	8,5		369,5		439,9	b	5,2		288,3		47,4		41,2	

*valores médios dos dois níveis de adubação; **valores médios dos quatro métodos de preparo do solo.

Tabela 3. Teor e conteúdo de nutrientes na biomassa residual de soja (safra 2012/2013) submetida a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$); ns: não significativo; traços indicam interação entre os fatores.

	C		N		H		S		O		Ca		Mg		K		P		Si		Al		Na		Cu		Fe		Mn		Zn	
	----- % -----										----- g kg ⁻¹ -----										----- mg kg ⁻¹ -----											
teor																																
PD*	41,8	ns	-		6,3	ns	0,4	ns	46,3	ns	-	4,8	ns	10,2	ns	0,3	ns	0,1	ns	237,3	b	200,0	ns	5,5	ns	-		15,7	ns	15,4	ns	
PC	41,5		-		6,3		0,2		46,6		-	4,6		11,7		0,2		0,3		364,7	ab	200,0		5,1		-		18,2		14,9		
PM	41,8		-		6,2		0,3		46,5		-	4,4		11,4		0,2		0,2		398,7	a	199,9		5,2		-		16,7		19,4		
PDE	42,1		-		6,3		0,2		46,5		-	4,6		9,6		0,3		0,2		266,7	b	199,9		5,1		-		17,5		17,7		
normal**	41,7	ns	-		6,2	ns	0,03	ns	46,4	ns	-	3,7	b	17,3	a	0,2	ns	0,2	b	166,1	b	200,0	ns	4,8	ns	-		19,8	ns	12,5	ns	
reduzido	41,9		-		6,3		0,6		46,5		-	5,6	a	4,1	b	0,3		0,3	a	467,7	a	199,9		5,7		-		14,3		21,2		
conteúdo																																
	----- kg ha ⁻¹ -----																	----- g ha ⁻¹ -----														
PD*	934,6	ns	21,3	ns	141,1	ns	6,7	ns	1.043,0	ns	9,5	ns	9,9	ns	27,7	ns	0,6	ns	0,3	ns	468,0	ns	448,9	ns	12,0	ns	458,1	ns	36,4	ns	31,8	ns
PC	925,3		18,2		139,3		3,8		1.035,0		9,9		9,9		30,9		0,5		0,6		674,9		445,5		11,1		575,7		43,1		31,3	
PM	902,1		17,8		135,0		4,5		1.004,0		8,7		9,0		29,6		0,5		0,3		708,4		431,7		10,9		549,1		37,8		37,2	
PDE	885,6		19,2		132,0		3,0		979,4		9,3		8,9		24,6		0,6		0,4		470,1		421,3		10,5		438,2		38,8		34,6	
normal**	1.214,0	a	21,4	a	182,0	a	0,8	ns	1.353,0	a	11,6	a	10,7	a	50,2	a	0,7	a	0,3	ns	480,5	ns	582,3	a	14,0	a	417,8	ns	57,3	a	36,3	ns
reduzido	610,1	b	16,9	b	91,7	b	8,2		678,5	b	7,1	b	8,2	b	6,1	b	0,4	b	0,4		680,2		291,5	b	8,3	b	592,8		20,7	b	31,2	

*valores médios dos dois níveis de adubação; **valores médios dos quatro métodos de preparo do solo.

Houve interação entre os fatores para os teores de N, Ca e Fe da biomassa residual da soja (Tabela 4). O nível de adubação reduzido, novamente, proporcionou os maiores teores desses elementos por causa do efeito de concentração já mencionado, exceto para os teores de Ca nos métodos de preparo PC e PDE e para o teor de Fe no PDE, onde o fator adubação não foi significativo. O PD no nível reduzido de adubação proporcionou o maior teor de N no tecido vegetal da soja (Tabela 4), o que pode estar associado ao ambiente mais favorável para a associação com a bactéria fixadora de N. Segundo Bala et al. (2003), a associação entre a planta hospedeira e a bactéria fixadora de N é altamente influenciada pela acidez do solo, que foi considerada alta no nível normal e média no nível reduzido, assim como em todos os sistemas de preparo (Raij et al., 1996). Assim, o PD em nível reduzido de adubação apresentou condição mais favorável para a simbiose (Tabela 1).

Tabela 4. Desdobramento da interação entre os fatores para os teores de nutrientes na biomassa residual de soja (safra 2012/2013) submetida a quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes minúsculas (na linha) e maiúsculas (na coluna), para cada atributo, diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$).

	N				Ca				Fe			
	normal		reduzido		normal		reduzido		normal		reduzido	
PD	7,3	Ab	13,8	Aa	3,7	ABb	5,4	Aa	120,3	Ab	346,6	Aa
PC	7,0	Ab	10,5	Ba	4,5	Aa	4,3	Aa	147,8	Ab	469,4	Aa
PM	7,2	Ab	10,3	Ba	3,4	Bb	5,2	Aa	162,3	Ab	460,3	Aa
PDE	7,8	Ab	11,5	Ba	4,3	ABa	4,6	Aa	151,2	Aa	318,6	Aa

A aplicação anual de K e P no nível normal de adubação, devido à presença desses nutrientes nos formulados, aumentou os teores dos elementos na camada arável do solo em 3,5 e 4 vezes em relação a não aplicação (Tabela 1), respectivamente. Com isso, houve maiores teores de K na biomassa residual da aveia branca e da soja, porém não houve influência nos teores de P do tecido dessas duas culturas (Tabelas 2 e 3). Este comportamento pode estar associado à redistribuição dos elementos na planta: mais de 75 % do P é exportado pela cultura da soja (Pauletti, 2004), ou seja, é direcionado para os grãos (Tarkalson et al., 2009; Deubel et al., 2011). Por outro lado, Rosolem et al. (2012) afirmam que grande parte do K absorvido pelas espécies agrícolas permanece na palhada. De forma semelhante, em estudo de 18 anos com doses crescentes de P, Messiga et al. (2012) observaram aumento no teor de P

nos grãos de milho e soja, ao passo que Zhang et al. (2011), em função da adubação em longo prazo com K, observaram aumento somente no teor de K na palha de trigo e milho, porém esse efeito não foi observado para o teor do nutriente no grão.

O teor de cinzas na biomassa das duas espécies não foi influenciado pelos métodos de preparo do solo, porém se mostraram estatisticamente superiores no nível normal de adubação (Tabela 5). Os teores de cinzas da biomassa residual de trigo e cevada encontrados por Allica et al. (2001) foram semelhantes aos obtidos neste trabalho, assim como os apresentados por Demirbas & Demirbas (2004) em relação à palha de milho. No entanto, de acordo com os resultados obtidos por estes últimos, as cinzas da biomassa de espécies florestais é aproximadamente um décimo do teor observado neste trabalho.

Os minerais presentes na biomassa permanecem praticamente inalterados após a queima nas caldeiras, pois não participam do processo de combustão. Assim, as cinzas podem retornar ao solo e servir como fonte de reposição dos nutrientes extraídos (Blander & Pelton, 1997), principalmente no que diz respeito ao K. A composição das cinzas também pode servir como base para avaliar a qualidade da biomassa destinada à produção de energia, visto que altos teores de K_2O e de SiO_2 são indesejáveis, pois podem levar à corrosão das caldeiras e diminuição da eficiência dos sistemas de combustão (Allica et al., 2001).

Tabela 5. Teor de cinzas e fracionamento químico (em %) da biomassa residual de aveia branca e soja submetida a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido), após vinte e três anos de manejo (média de três repetições). Valores seguidos de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente (Tukey; $p < 0,05$); ns: não significativo.

	aveia branca				soja			
	cinzas		frações ⁽⁴⁾		cinzas		frações	

A participação percentual do K_2O na composição das cinzas da biomassa de aveia branca e soja é bastante expressiva, principalmente nos tratamentos com adubação normal (Figura 3). Essa influência se confirma pela correlação positiva entre o K^+ trocável do solo e os teores de cinzas na biomassa de ambas as culturas (Figura 4), além da forte correlação das cinzas com o teor de K nas biomassas ($r = 0,89$ para soja e $r = 0,92$ para aveia branca, $p < 0,01$). Este resultado indica, portanto, que as culturas agrícolas que recebem adubações anuais com KCl absorvem mais K e, conseqüentemente, apresentam maior teor de cinzas, o que pode levar à necessidade de manutenções mais frequentes nas caldeiras.

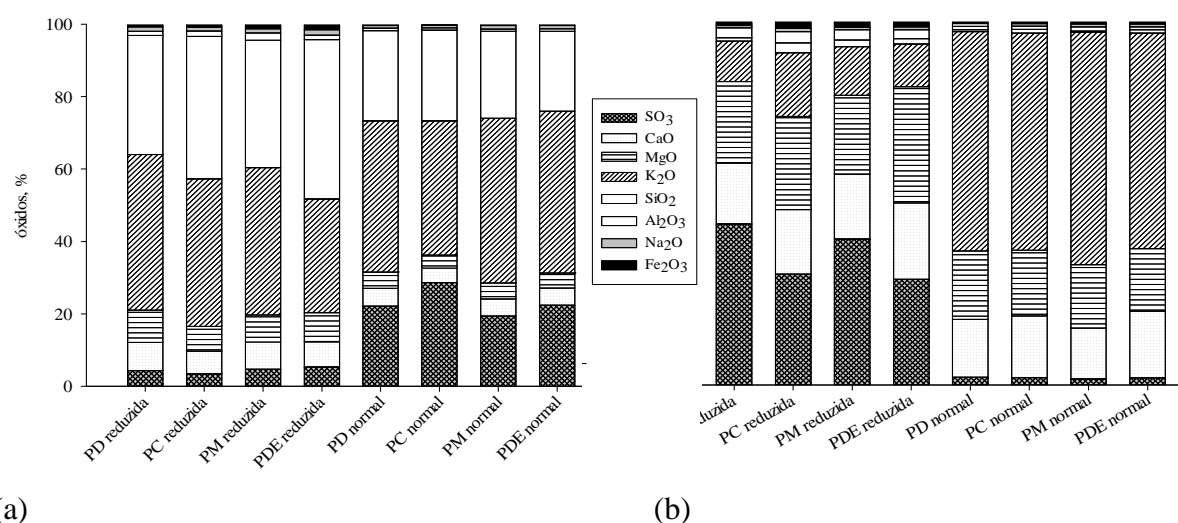


Figura 3. Composição das cinzas (%) da biomassa de aveia branca (a) e soja (b) submetida a quatro métodos de preparo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido).

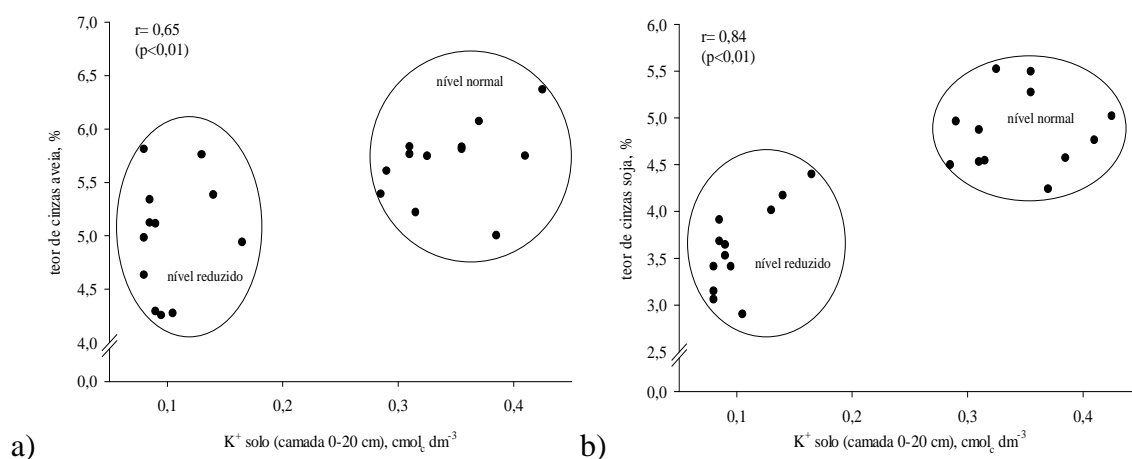


Figura 4. Correlação de Pearson ($p < 0,01$) entre o teor de cinzas do tecido vegetal de aveia branca (a) e soja (b) e os teores de K^+ trocável de um Latossolo submetido a quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido).

2.3.3. POTENCIAL TEÓRICO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

O PCS da biomassa residual da aveia branca e da soja não foi significativamente influenciado pelos métodos de preparo do solo e pelos níveis de adubação (Figura 5), apesar da influência da adubação sobre a qualidade das duas biomassas, demonstrado pela composição elementar relatada no subitem anterior. Os maiores teores de cinzas, observados no nível normal de adubação (Tabela 5), não foram suficientes para afetar o PCS significativamente, apesar da correlação inversa entre essas duas características ser frequentemente mencionada na literatura (Allica et al., 2001; Sheng & Azevedo, 2005; Protásio et al., 2012).

Os elementos C e H são os que mais afetam o PCS das biomassas, em função de sua alta densidade energética. Contudo, apesar da correlação significativa e positiva entre o PCS e os teores de C na biomassa da soja ($r = 0,70$; $p < 0,01$), os tratamentos empregados não influenciaram nos teores de C e H das duas culturas (Tabelas 2 e 3), o que pode explicar a pouca variação de PCS observada. Diversos autores relatam a correlação existente entre o PCS e os teores de C e H em variados materiais lignocelulósicos (Demirbas & Demirbas, 2004; Sheng & Azevedo, 2005; Protásio et al., 2011). Apesar disso, os componentes orgânicos se mantêm dentro de uma gama restrita de variação, conforme observado por Armolaitis et al. (2013), que relataram diferenças sutis nos teores de C de diferentes partes de espécies florestais e não observaram diferenças em relação ao teor desse nutriente em função do desenvolvimento das árvores. Isso pode indicar, portanto, que os teores de C e H variam entre espécies, mas possuem baixa variação dentro de cada espécie, independentemente das práticas culturais empregadas.

O PCS da biomassa das duas culturas, na média dos tratamentos ($18,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ para soja e $17,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ para aveia branca), foi comparável ao PCS de espécies florestais comumente utilizadas para lenha, como pinus e eucalipto (Telmo & Lousada, 2011). Observa-se que o PCS da soja foi superior ao encontrado na biomassa da aveia branca, o que pode ser atribuído ao maior teor de lignina (Protásio et al., 2012) e menor teor de cinzas (Sheng & Azevedo, 2005; Paula et al., 2011) encontrado nessa espécie (Tabela 5). A soja apresentou, ainda, maior BRT (Figura 2), o que leva a crer que esta espécie apresenta potencial de remoção dos resíduos mais favorável em relação à aveia branca, que segundo Lal (2008), é tão maior quanto maior for a produção de biomassa e a presença de compostos refratários,

como a lignina. Contudo, a proporção da biomassa residual não colhida, ou seja, aquela que permanece no campo após a colheita dos grãos em função da altura de corte da plataforma da colhedora, em relação à BRT, foi maior na aveia branca (38,2 %) do que na soja (20,2 %). Sob esta perspectiva, após a colheita dos grãos, sobra mais biomassa no campo no cultivo da aveia branca, o que é particularmente importante para a manutenção da cobertura do solo e para a prevenção da erosão hídrica e eólica.

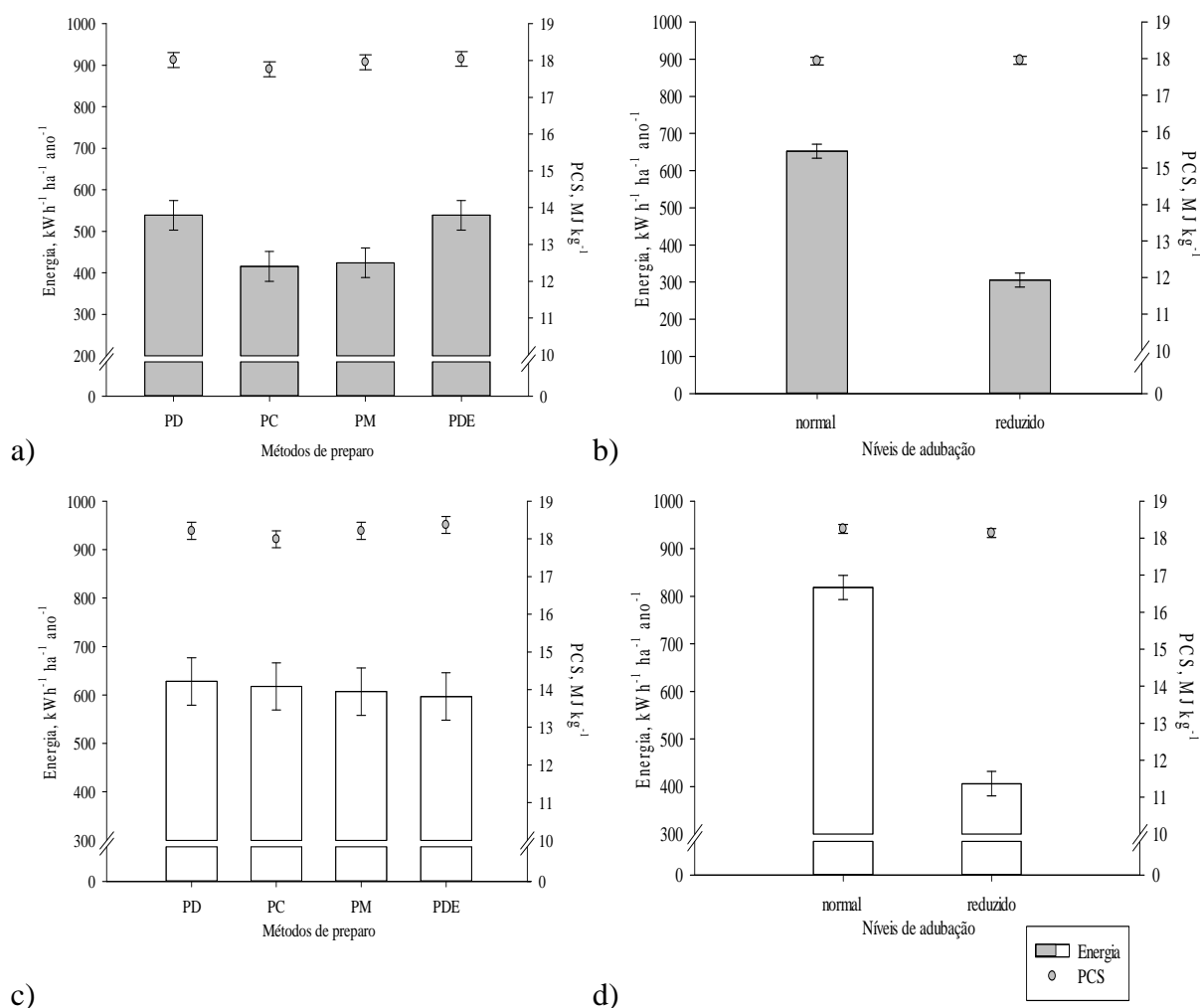


Figura 5. Potencial teórico de produção de energia elétrica (kWh ha⁻¹ ano⁻¹) e poder calorífico superior (MJ kg⁻¹) da biomassa residual de aveia branca (a e b) e soja (c e d) em função de quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) e dois níveis de adubação (normal e reduzido). As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey; p<0,05).

O comportamento do potencial energético das biomassas avaliadas seguiu o mesmo padrão observado em relação à produtividade da biomassa, ou seja, quanto maior a produtividade de biomassa (nos métodos de preparo PD e PDE, para a aveia, e no nível normal de adubação, para as duas culturas), maior foi o potencial teórico de produção de energia por unidade de área (Figura 5). Com isso, infere-se que o potencial energético da biomassa residual das culturas da aveia branca e soja foi afetado pelo manejo do solo e da adubação somente pelo efeito que estas práticas tiveram sobre a quantidade de biomassa produzida, e não sobre a qualidade dessa matéria prima.

2.4. CONCLUSÕES

- 1) Os métodos de preparo do solo afetam de forma diferenciada a produtividade de grãos e biomassa de aveia branca e soja, porém a adubação proporciona maior produtividade para ambas as culturas;
- 2) A composição da biomassa residual de aveia branca e soja é influenciada pelos métodos de preparo do solo, contudo a adubação afeta essas características em maior magnitude;
- 3) Apesar de a adubação proporcionar maior teor de cinzas nas biomassas de aveia branca e soja, isso não afeta o poder calorífico das mesmas;
- 4) O preparo do solo e a adubação alteram o potencial teórico de produção de energia elétrica a partir da biomassa residual de aveia branca e soja pela influência sobre a produtividade de biomassa e não pelas alterações ocasionadas na composição do material.

2.5. LITERATURA CITADA

AL-KAISI, M. & KWAW-MENSAH, D. Effect of tillage and nitrogen rate on corn yield and nitrogen and phosphorus uptake in a corn-soybean rotation. *Agronomy Journal*, 99:1548-1558, 2007.

ALLICA, J.H.; MITRE, A.J.; BUSTAMANTE, J.A.G.; ITOIZ, C.; BLANCO, F.; ALKORTA, I & GARBISU, C. Straw quality for its combustion in a straw-fired power plant. *Biomass and Bioenergy*, 21:249-258, 2001.

AMARAL, A.S. & ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36:695-702, 2001.

ANDREWS, S.S. Crop residue removal for biomass energy production: effects on soils and recommendations. Soil Quality National Technology Development Team, USDA. 2006.

ARMOLAITIS, K.; VARNAGIRYTE-KABASINSKIENE, I.; STUPAK, I.; KUKKOLA, M.; MIKSYS, V. & WÓJCIK, J. Carbon and nutrients of Scots pine stands on sandy soils in Lithuania in relation to bioenergy sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 54:250-259, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico, 1984.

BALA, A.; MURPHY, P.J.; OSUNDE, A.O. & GILLER, K.E. Nodulation of tree legumes and the ecology of their native rhizobial populations in tropical soils. *Applied Soil Ecology*, 22:211-223, 2003.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. *Ciência Rural*, 28:23-28, 1998.

BERCHIELLI, T.T.; SADER, A.P.O.; TONANI, F.L.; PAZIANI, S.F. & ANDRADE, P. Avaliação da determinação da fibra em detergente neutro e da fibra em detergente ácido pelo sistema ANKOM. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 30:1572-1578, 2001.

BLANDER, M. & PELTON, A.D. The inorganic chemistry of the combustion of wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 12:295-298, 1997.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil and Tillage Research*, 3:135-146, 1983.

CHEN, Y.; LIU, S.; LI, H.; LI, X.F.; SONG, C.Y.; CRUSE, R.M. & ZHANG, X.Y. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China. *Soil & Tillage Research*, 115-116:56-61, 2011.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento: 12º Levantamento de Grãos, safra setembro 2013. Disponível em <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_09_10_16_05_53_boletim_portugues_setembro_2013.pdf>. Acesso em: 25. Set. 2013.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:527-535, 2003.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30:219-230, 2004.

DEMIRBAS, A & DEMIRBAS, A.H. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy Exploration and Exploitation*, 22:135-144, 2004.

DEUBEL, A.; HOFMANN, B. & ORZESSEK, D. Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. *Soil & Tillage Research*, 117:85-92, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (BRASIL). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (BRASIL). Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012. Rio de Janeiro, 288 p.: 182 il., 2013.

FONTOURA, S.M.V. ; VIEIRA, R.C.B. ; BAYER, C.; ERNANI, P.R. & MORAES, R.P. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em latossolo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1907-1914, 2010.

FURLANI, P.R. & GALLO, J.R. Determinação de silício em material vegetal, pelo método colorimétrico do “azul-de-molibdênio”. *Bragantia*, 37:5-11, 1978.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A.G.; & BUENO, J.L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103:249-258, 2012.

HOSKINSON, R.L.; KARLEN, D.L.; BIRRELL, S.J.; RADTKE, C.W. & WILHELM, W. Engineering, nutrient removal, and feedstock conversion evaluations of four corn stover harvest scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 31:126-136, 2007.

KOLLMANN, F.F.P. & CÔTÉ, W.A. Principles of wood science and technology. 1. ed. New York, Springer, 1968.

LAL, R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management*, 28:747-758, 2008.

LORA, E.S. & ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:777–788, 2009.

MARCELO, A.V.; CORÁ, J.E. & FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I – Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:1553-1567, 2012.

MARTINS, A. P. L. & REISSMANN, C. B. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. *Scientia Agraria*, 8:1-17, 2007.

MESSIGA, A.J.; ZIADI, N.; MOREL, C.; GRANT, C.; TREMBLAY, G.; LAMARRE, G. & PARENT, L.E. Long term impact of tillage practices and biennial P and N fertilization on maize and soybean yields and soil P status. *Field Crops Research*, 133:10-22, 2012.

MOEBIUS-CLUNE, B.N.; van ES, H.M.; IDOWU, O.J.; SCHINDELBECK, R.R.; MOEBIUS-CLUNE, D.J.; WOLFE, D.W.; ABAWI, G.S.; THIES, J.E.; GUGINO, B.K. & LUCEY, R. Long-term effects of harvesting maize stover and tillage on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 72:960-969, 2008.

NOGUEIRA, L.A.H. & LORA, E.E.S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2003. 199p.

PAULA, L.E.R.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A. & BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, 17:237-246, 2011.

PAULETTI, V. *Nutrientes: teores e interpretações*. 2. ed. Castro, Fundação ABC, 2004. 86p.

PAULETTI, V.; LIMA, M.R.; BARCIK, C. & BITTENCOURT, A. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. *Ciência Rural*, 33:491-495, 2003.

POWERS, S.E.; ASCOUGH II, J.C.; NELSON, R.G. & LAROCQUE, G.R. Modeling water and soil quality environmental impacts associated with bioenergy crop production and biomass removal in the Midwest USA. *Ecological Modelling*, 222:2430-2447, 2011.

PROTÁSIO, T.P.; BUFALINO, L. TONOLI, G.H.D.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F. & JÚNIOR, M.G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31:113-122, 2011.

PROTÁSIO, T.P.; TONOLI, G.H.D.; JÚNIOR, M.G.; BUFALINO, L.; COUTO, A.M. & TRUGILHO, P.F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. *Cerne*, 18:433-439, 2012.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química do solo para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendação de adubação e calagem para o estado do São Paulo, 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285p.

ROSOLEM, C.A.; VICENTINI, J.P.T.M.M. & STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36:1507-1515, 2012.

SEAB, Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná – Departamento de Economia Rural (DERAL). Precipitação pluviométrica regional (2012/2013). Disponível em <<http://www.agricultura.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=74>>. Acesso em: 19. Dez. 2013.

SHENG, C & AZEVEDO, J.L.T. Estimating the higher heating value of biomass fuel from basic analysis data. Biomass and Bioenergy, 28:499-507, 2005.

SILVEIRA, P.M. & STONE, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 7:240-244, 2003.

TARKALSON, D.D.; BROWN, B.; KOK, H. & BJORNEBERG, D.L. Impact of removing straw from wheat and barley fields: a literature review. Better Crops, 93:17-19, 2009.

TELMO, C. & LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. Biomass and Bioenergy, 35:2634-2639, 2011.

VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ANGHINONI, I; ERNANI, P.R. & MORAES, R.P. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em latossolos sob

plantio direto no centro-sul do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37:188-198, 2012.

VOGELER, I.; ROGASIK, J.; FUNDER, U.; PANTEN, K. & SCHNUG, E. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. Soil & Tillage Research, 103:137-143, 2009.

ZHANG, H.M.; YANG, X.Y.; HE, X.H.; XU, M.G.; HUANG, S.M.; LIU, H. & WANG, B.R. Effect of long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China. Pedosphere, 21:154-163, 2011.

CONCLUSÃO GERAL

A partir dos dados obtidos neste trabalho, conclui-se que a fertilidade do solo é afetada pelo manejo da adubação e pelos métodos de preparo, onde a condição geral de melhor ambiente para o desenvolvimento das culturas ocorre nos métodos conservacionistas de solo (aveia branca) com nível adequado de adubação (aveia branca e soja). Os diferentes ambientes de crescimento das plantas, proporcionados pelo manejo do solo, afetam a composição química e elementar das biomassas de soja e aveia branca, mas não sua qualidade como insumo energético. Dessa maneira, o potencial teórico de produção de energia dos resíduos das duas culturas é influenciado somente pela quantidade de biomassa produzida, não sendo afetado pelas alterações que o preparo do solo e a adubação proporcionam em suas composições químicas.

APÊNDICE

Apêndice 1. Adubações N-P₂O₅-K₂O realizadas em um experimento de longa duração com quatro métodos de preparo do solo (plantio direto, PD; preparo convencional, PC; preparo mínimo, PM; e plantio direto escarificado, PDE) em Ponta Grossa (PR). Valores entre parênteses no nível normal de adubação se referem à aplicação adicional de nitrogênio (nível reduzido recebeu somente aplicação de nitrogênio nas culturas do milho, trigo e aveia branca).

Safr/espécie	Níveis de adubação		Safr/espécie	Níveis de adubação	
	Normal	Reduzido		Normal	Reduzido
	----- kg ha ⁻¹ -----			----- kg ha ⁻¹ -----	
1989 a. preta	-	-	2001 trigo	20(+60)-40-40	60-00-00
89/1990 soja	00-40-40	-	01/2002 soja	00-40-40	-
1990 tremoço	-	-	2002 a. preta	-	-
90/1991 milho	30(+80)-90-48	80-00-00	02/2003 milho	30(+90)-60-60	90-00-00
1991 a. branca	-	-	2003 a. branca	20(+45)-40-40	45-00-00
91/1992 soja	00-40-40	-	03/2004 soja	00-40-40	-
1992 trigo	10(+40)-20-20	40-00-00	2004 trigo	24(+45)-90-60	45-00-00
92/1993 soja	00-40-40	-	04/2005 soja	00-40-40	-
1993 ervilhaca	-	-	2005 a. preta	-	-
93/1994 milho	30(+80)-90-48	80-00-00	05/2006 milho	30(+130)-60-60	130-00-00
1994 a. branca	-	-	2006 a. branca	30(+67,5)-60-60	67,5-00-00
94/1995 soja	00-60-60	-	06/2007 soja	00-50-50	-
1995 trigo	10(+40)-20-20	40-00-00	2007 trigo	30(+67,5)-60-60	67,5-00-00
95/1996 soja	00-60-60	-	07/2008 soja	00-60-60	-
1996 ervilhaca	-	-	2008 a. preta	-	-
96/1997 milho	36(+80)-72-48	80-00-00	08/2009 milho	36(+135)-96-90	135-00-00
1997 a. preta	-	-	2009 a. branca	30(+45)-60-60	45-00-00
97/1998 soja	00-60-60	-	09/2010 soja	00-60-60	-
1998 trigo	00(+60)-40-40	60-00-00	2010 trigo	30(+67,5)-60-60	67,5-00-00
98/1999 soja	00-40-40	-	10/2011 soja	00-60-60	-
1999 a. preta	-	-	2011 a. preta	-	-
99/2000 milho	30(+90)-60-60	90-00-00	11/2012 milho	36(+135)-96-90	135-00-00
2000 a. branca	-	-	2012 a. branca	16(+76,5)-60-70	76,5-00-00
00/2001 soja	00-40-40	-	12/2013 soja	00-60-60	-